

ЗЕМЛЯ И

№6 (360)

НОЯБРЬ-ДЕКАБРЬ, 2024

астрономия
геофизика
космонавтика

ВСЕЛЕННАЯ

ISSN 0044-3948



**Экстремальные
солнечные и геомагнитные
события**

**Бывают ли на Солнце
супервспышки?**

**О солнечном цикле
замолвите слово**

СОЛНЦЕ И ЧЕЛОВЕК: СОХРАНЯЮТСЯ ЛИ СТАРЫЕ СВЯЗИ В XXI ВЕКЕ?



НАУКА

— 1727 —

ПОДПИШИТЕСЬ НА ЖУРНАЛЫ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»

печатные и электронные версии

В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ NAUKABOOKS.RU

- ⇒ Зайдите на сайт.
- ⇒ Выберите журнал.
- ⇒ Укажите контактные данные получателя.
- ⇒ Оплатите заказ онлайн.

Отдельные номера журналов можно купить
в магазине «Академкнига» по адресу:
г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1.



ПО E-MAIL И ТЕЛЕФОНУ

journals@naukapublishers.ru или +7(495) 276-77-35

Сообщите, на какие журналы вы хотите подписаться, а также
свои контактные данные. Менеджер поможет оформить подписку.

ЧЕРЕЗ ПОДПИСНЫЕ АГЕНТСТВА



ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

астрономия
геофизика
космонавтика

№6 (360)

НОЯБРЬ-ДЕКАБРЬ, 2024

ISSN 0044-3948

Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
«Наука»
Москва



Лауреат Беляевской премии
2023 г.

На обложке:

Изображения Солнца, полученные
прибором AIA на космическом
аппарате SDO (NASA),
8 мая 2024 г. в диапазонах
171 ангстрем (первая страница
обложки) и 304 ангстрем
(четвертая страница обложки,
отображено зеркально).

Изображение: NASA/SDO
and the AIA, EVE, and HMI
science teams

В НОМЕРЕ:

Колонка редактора	3
МИНЛИГАРЕЕВ В.Т., БОГАЧЁВ С.А. Экстремальные солнечные и геомагнитные события в мае 2024 года	6
ЗИМОВЕЦ И.В., ШАРЫКИН И.Н. Солнечные вспышки, произошедшие в мае 2024 года: был ли возможен прогноз?	18
КИРИЧЕНКО А.С. Обзор сообщений о последствиях солнечных и геомагнитных событий в мае 2024 года	38
БОГАЧЁВ С.А. Бывают ли на Солнце супервспышки?	45
ЛОБОДА И.П. О солнечном цикле замолвите слово	56
ЗЕНЧЕНКО Т.А. Солнце и человек: сохраняются ли старые связи в XXI веке?	72

Космическое образование

Солнце и климат в задачах и ответах	92
-------------------------------------	----

Коротко и интересно

«Джеймс Уэбб» обнаружил самую маленькую блуждающую планету	98
Вулканизм на Луне стал моложе	100

Обсерватории, институты, планетарии

ГРЕБЕНЕВ С.А. О необходимости развертывания астрономических наблюдений на станции «Восток» в Антарктиде	103
Указатель статей и заметок, опубликованных в 2024 году	122
Table of Content	125

© Российская академия наук, 2024

© Редакция журнала «Земля и Вселенная» (составитель), 2024

© ФГБУ «Издательство «Наука», 2024

Earth&Universe: Astronomy, Geophysics, Cosmonautics
Bimonthly popular scientific magazine of the Russian Academy of Sciences & NAUKA Publishing.
Founded 1965.
Published by NAUKA Publishing, Shubinsky per., 6, str. 1, 121099, Moscow, Russia.

Редакционная коллегия:

главный редактор
академик Л.М. ЗЕЛЕНЬИЙ,
летчик-космонавт
П.В. ВИНОГРАДОВ,
зам. главного редактора
кандидат филолог. наук
О.В. ЗАКУТНЯЯ,
доктор исторических наук
К.В. ИВАНОВ,
летчик-космонавт
А.Ю. КАЛЕРИ,
кандидат физ.-мат. наук
О.Ю. ЛАВРОВА,
член-корр. РАН
А.А. ЛУТОВИНОВ,
зам. главного редактора
доктор физ.-мат. наук
О.Ю. МАЛКОВ,
доктор физ.-мат. наук
И.Г. МИТРОФАНОВ,
академик И.И. МОХОВ,
член-корр. РАН
И.Д. НОВИКОВ,
член-корр. РАН
К.А. ПОСТНОВ,
доктор физ.-мат. наук
М.В. РОДКИН,
научный директор
Московского планетария
Ф.Б. РУБЛЕВА,
член-корр. РАН
А.Л. СОБИСЕВИЧ,
член-корр. РАН
О.Н. СОЛОМИНА,
академик В.А. СОЛОВЬЕВ,
академик
А.М. ЧЕРЕПАЩУК,
доктор физ.-мат. наук
В.В. ШЕВЧЕНКО,
член-корр. РАН
Б.М. ШУСТОВ

Editorial Board:

Editor-in-chief
Acad. Dr. Lev M. ZELENYI
Acad. Dr. Anatoly M. CHEREPASCHUK
Dr. Konstantin V. IVANOV
Pilot-cosmonaut Alexander Yu. KALERI
Dr. Olga Yu. LAVROVA
RAS Corr. Member Dr. Alexander A. LUTOVINOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Oleg Yu. MALKOV
Dr. Igor G. MITROFANOV
Acad. Dr. Igor I. MOKHOV
RAS Corr. Member Dr. Igor D. NOVIKOV
RAS Corr. Member Dr. Konstantin A. POSTNOV
Dr. Mikhail V. RODKIN
Faina B. RUBLEVA
Dr. Vladislav V. SHEVCHENKO
RAS Corr. Member Dr. Boris M. SHUSTOV
RAS Corr. Member Dr. Alexey L. SOBISEVICH
RAS Corr. Member Dr. Olga N. SOLOMINA
RAS Corr. Member Dr. Vladimir A. SOLOVYEV
Pilot-cosmonaut Pavel V. VINOGRADOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Olga V. ZAKUTNYAYA

Колонка редактора

Дорогие читатели, коллеги, друзья!

К нашему большому сожалению, выход журнала задержался, так что вы получаете этот завершающий номер 2024 года уже в 2025 году. Я приношу свои извинения за задержку и также хочу предупредить читателей о том, что в 2025 году первый номер журнала будет сдвоенным (№ 1 и 2) и выйдет весной 2025.

Теперь – о журнале, который лежит перед Вами. Он посвящен самой близкой к Земле звезде – Солнцу. Приглашенным редактором этого номера любезно согласился стать Сергей Александрович Богачёв, специалист в области физики Солнца, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории солнечной астрономии и гелиофизического приборостроения ИКИ РАН и Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН. Сергей Александрович также долгое время работал в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Его имя сегодня становится хорошо известно не только в научных кругах, так как Сергей очень активно и плодотворно занимается научной популяризацией. Наверняка многие видели или читали его интервью, где он не устает рассказывать о том, почему не стоит бояться магнитных бурь.

С удовольствием предоставляю ему слово!

*Главный редактор журнала «Земля и Вселенная»
академик Лев Матвеевич Зелёный*

* * *

Когда этот номер только задумывался и не было ничего, кроме базовой идеи посвятить его физике Солнца, я попытался сам для себя определить стартовую точку, а именно – что современный образованный человек знает о Солнце, как он представляет себе его физику.

И я понял, что на первый поверхностный взгляд, если не погружаться в тематику глубоко, Солнце кажется объектом, который вообще не имеет физики. Действительно, мы каждый день видим на небе идеальный круг (в самом деле почти идеальный – Солнце сжато на полюсе лишь на одну сотысячную своего размера, как если бы круг диаметром 100 метров, размером с футбольное поле, сжали на 1 мм), который, сколько бы мы ни жили, имеет визуальную одну и ту же постоянную светимость. Если задуматься, какие физические свойства у этого круга можно определить, то получится, что



у него можно измерить радиус, светимость и, напоследок, вспомнив, что это все-таки не круг, а небесное тело, – еще и массу. Особо догадливые добавляют еще возраст и период вращения, а совсем дотошные еще и химический состав, но на этом пальцы прекратят загигать даже самые упорные, так как свойства, а с ними и физика Солнца, покажутся полностью исчерпанными.

С этим «бытовым» представлением, казалось бы, согласны и сами астрофизики. В частности, широко известна фраза Артура Стенди Эддингтона (английского физика, создавшего в начале XX века современную теорию внутреннего строения звезд): «Ничего нет более простого, чем звезда».

Справедливости ради можно заметить, что в действительности полная фраза Эддингтона звучала несколько иначе. В своей работе «The Theory of Relativity and its Influence on Scientific Thought» в 1922 г. Эддингтон написал: *At terrestrial temperatures matter has complex properties which are likely to prove most difficult to unravel; but it is reasonable to hope that in the not too distant future we shall be competent to understand so simple*

a thing as a star (При земных температурах материя обладает сложными свойствами, которые, вероятно, будет труднее всего разгадать; однако разумно надеяться, что в не столь отдаленном будущем мы сможем понять такую простую вещь, как звезда). Смысл, впрочем, и в «укороченном варианте» передан точно. Эддингтон, глубже всех на тот момент проникнувший во внутреннее строение звезд, совершенно однозначно обозначил звезды как много более простые объекты, чем близкая нам планета Земля, а также ясно и правильно указал на причины этой простоты – при «звездных» температурах любые виды вещества разрушаются до простейших состояний, которые в принципе не могут обладать сложной физикой. Это мнение, как уже отмечено, полностью совпадает с тем, что мы видим каждый день своими глазами: Солнце кажется однородным газовым шаром, не имеющим особых физических свойств, который просто существует рядом с нами, бескорыстно даря тепло и свет и даже не пытаясь привлечь к себе какое-то особое внимание.

Тем не менее физика у Солнца есть, и она в некотором смысле обрушивается на нас каждые 11 лет в период очередного максимума солнечной активности. Последний такой период был в 2012–2024 гг. (максимум предыдущего 24-го солнечного цикла) и, прибавив к этому интервалу 11 лет, мы получим 2023–2025 годы, т. е. то время, в котором мы сейчас и находимся.

Здесь можно задаться вопросом, а где же ошибся Эддингтон и ошибся ли он вообще, так как тот набор явлений и структур, который порождает Солнце только в доступных нам видимых слоях (протуберанцы, пламенные волокна, магнитные петли, солнечные пятна, гранулы, факелы, флоккулы и т. д. и т. п.), явно противоречит представлениям о предельной простоте.

Стоит заметить, что Эддингтон говорил все же больше о внутреннем строении звезд, а оно пока еще считается простым, хотя не исключено, что и тут нас ждут сюрпризы в будущем. В конце концов, энергия для взрывной солнеч-

ной активности, судя по всему, копится именно внутри Солнца (по современным представлениям на глубине около $1/3$ его радиуса). Но все же в его фразе был и фундаментальный изъян, который заключается в том, что простота исходного вещества не означает автоматически простоты физики.

Многочисленные примеры, опровергающие это, нам хорошо известны – это живые организмы или жизнь в широком понимании, которая, в некотором смысле, развивается в направлении, противоположном «законам энтропии»: не от сложного к простому, а от простейших состояний в сторону их усложнения. Нечто подобное, хотя и на совершенно иной материальной основе, происходит на Солнце. Потоки энергии, которые формируются в солнечном ядре, частично поглощаются самим Солнцем, которое тратит эту энергию на собственное усложнение, на преобразование из базового однородного шара из протонов и электронов, которым оно родилось, в сложный физический объект.

Мы не знаем, что эта энергия делает с Солнцем внутри – не исключено, что и там рождается сложная физика, которую мы пока даже не можем вообразить (как, наверное, не смогли бы умозрительно придумать физику солнечных вспышек, если бы их не наблюдали). Но те слои Солнца, которые доступны нашим приборам (это так называемая солнечная атмосфера) преобразуются Солнцем до неузнаваемости.

На этом, однако, аналогии с процессами на Земле заканчиваются, так как те механизмы, которые отвечают за усложнение земных биологических структур (сложная молекулярная химия), возможны лишь в нашем предельно холодном по космическим меркам мире. На Солнце же, в условиях миллионных температур и, действительно, почти полного распада вещества, единственной связующей силой могут быть электрические и магнитные поля. Именно они и обеспечивают всю наблюдаемую сложность солнечной физики. В этом выпуске почти

в каждой статье вы будете снова и снова встречать эти слова – «электрическое и магнитное поле» и, надеюсь, что не будете этому удивляться после прочтения введения, так как это именно те два инструмента, которыми Солнце делает себя тем, что (хотелось даже написать «кто») оно есть.

Я не хотел бы предвосхищать материалы выпуска, но скажу, что несмотря на огромное внимание, которое уделяется Солнцу учеными (а прямо сейчас в космосе летает не менее десяти специализированных обсерваторий, которые ведут его непрерывное исследование), в физике Солнца по-прежнему очень много загадок. Главной, конечно, является солнечный цикл. С одной стороны мы понимаем, что такого рода масштабные процессы, как цикл активности, должны определяться глобальными характеристиками Солнца, но, с другой стороны, какой-либо формулы, в которую мы в правой части подставили бы параметры Солнца (масса, радиус, период вращения), а в левой получили бы 11 лет (период солнечного цикла) у нас нет до сих пор, несмотря на все годы исследований. На этом фоне высказываются даже мнения, что цикл индуцируется снаружи, например, в приложении к Солнечной системе, планетой Юпитер, которая вращается вокруг Солнца с близким периодом, равным 11.8 лет.

Впрочем, большинство ученых все же считает, что ответы на загадки Солнца следует искать внутри него. Мы также все еще не понимаем, как над «холодной» (около 6000 градусов) поверхностью Солнца формируется и устойчиво существует горячая (1–2 миллиона градусов) солнечная корона. Ну и, как ни грустно признаваться, мы все еще не можем с удовлетворительной точностью прогнозировать солнечную активность больше, чем на несколько дней вперед. Замечу, впрочем, что последнее является общей проблемой физики, так как даже полное знание физических принципов, на которых основан сложный многопараметрический процесс, не позволяет прогнозировать этот процесс, так как

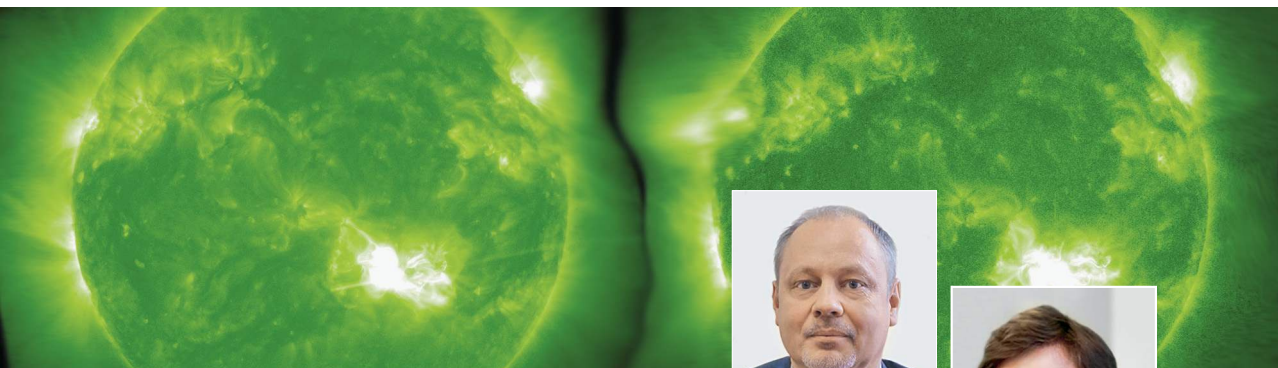
для этого нужно точное знание начального значения всех параметров. Тем, кто с этим не согласится, я хочу предложить спрогнозировать, куда в следующий раз ударит молния, при том, что физические принципы, на которых основано действие атмосферного электричества, хорошо известны и даже преподаются в школе.

В похожей ситуации (ограниченность точных исходных данных) работает и современная физика Солнца. Тем не менее точность прогноза, хоть и медленно, но растет. Очень интересно влияние Солнца на климат – интересно и неисчерпаемо. Мы решили попробовать применить в этом выпуске не вполне стандартный формат – подать эту тему через небольшой набор физических задач с ответами. Надеемся, что он покажется интересным. И наконец, мы не могли и не имели права пройти мимо тематики влияния солнечной активности на биосферу и на человека. Совершенно невозможно сколько-либо полно отразить весь объем знаний и споров, ведущихся вокруг данного направления, которое, несмотря на это, с каждым годом завоевывает все более сильные позиции. Тем не менее некоторые материалы на эту тему вы также найдете в выпуске.

В целом, очень надеюсь, что среди представленных статей каждый обнаружит для себя что-то новое и интересное, а также рассчитываю, что когда вы в следующий раз посмотрите на красивый, идеально ровный солнечный диск на закатном или рассветном небе, то еще раз поразитесь, как многообразен физический мир и насколько сложными (а порой и загадочными) при ближайшем изучении могут оказаться привычные, знакомые с детства, и казалось бы, полностью понятные объекты.

*Приглашенный редактор
Сергей Александрович Богачёв
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией
солнечно-земной физики
Института космических исследований
Российской академии наук*

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ И ГЕОМАГНИТНЫЕ СОБЫТИЯ В МАЕ 2024 года



МИНЛИГАРЕЕВ Владимир Тимурович,

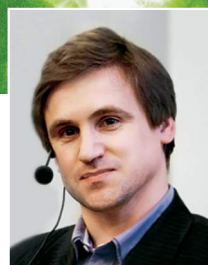
доктор технических наук, ФГБУ «ИПГ»

БОГАЧЁВ Сергей Александрович,

доктор физико-математических наук,

Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/5004439482406001X



Поступила в редакцию: 11.09.2024

Принята к публикации: 11.09.2024

Солнечная активность является предметом интенсивного научного исследования в силу своей прикладной значимости (в том числе из-за воздействия на атмосферу и магнитное поле Земли и из-за влияния на космическую деятельность), а также по причине все еще недостаточного понимания механизмов накопления и высвобождения энергии солнечных вспышек и выбросов. Особый интерес в этом контексте представляют крупные события, т. е. вспышки высших баллов (X класс), а также геомагнитные бури с индексами $K_p = 8$ и 9 .

В мае 2024 года был зарегистрирован ряд крупных активных событий как в области вспышечной, так и геомагнитной активности, который

по состоянию на момент написания данной публикации (вторая половина 2024 года) является самым крупным всплеском активности сразу за 2 последних солнечных цикла – предшествовавший 24-й цикл, продолжавшийся с декабря 2008 года по декабрь 2019 года, и текущий 25-й цикл, максимум которого, по прогнозам, должен прийти на 2024–2025 годы.

В настоящем обзоре мы представляем подробную информацию о зарегистрированных в этот период событиях, полученную в ходе космических и наземных наблюдений. Информация сгруппирована по основным типам (вспышки, выбросы массы, потоки частиц, геомагнитная активность).

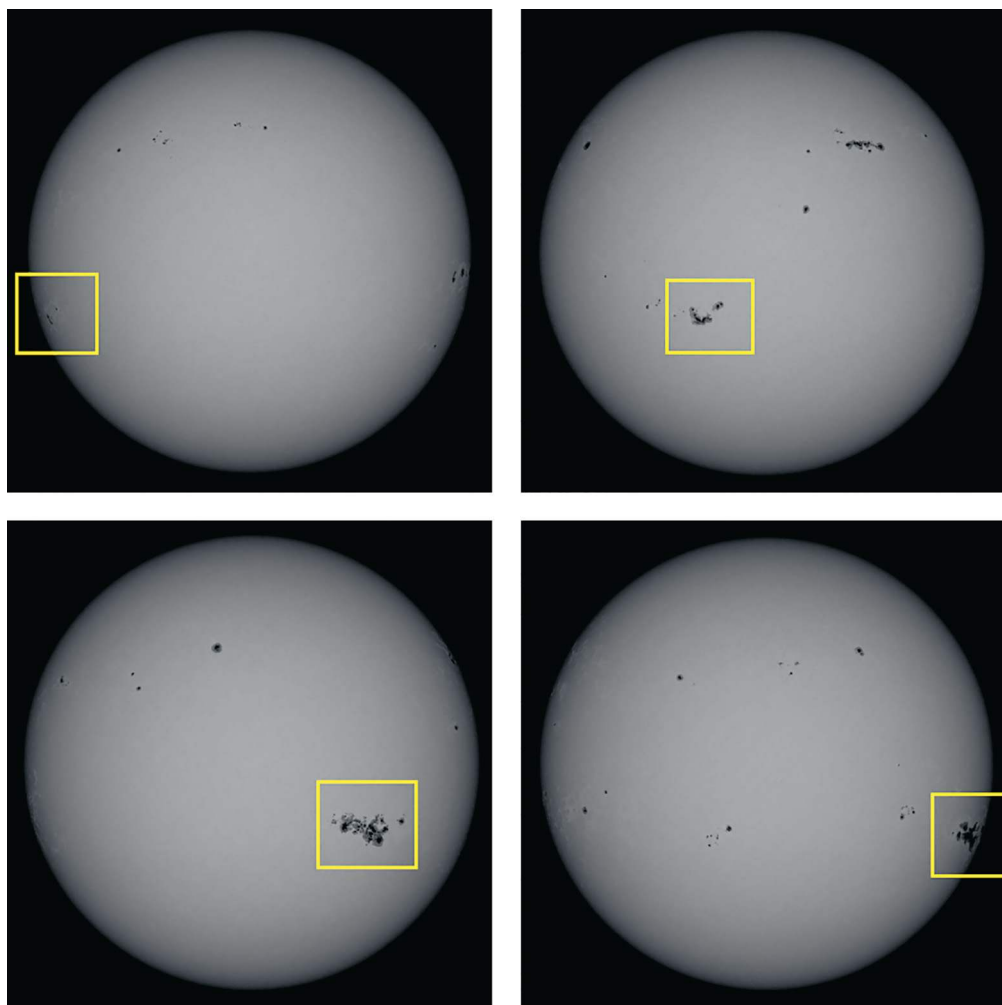
ЦЕНТРЫ АКТИВНОСТИ, ВЫЗВАВШИЕ СОБЫТИЯ

Основным источником информации о расположении и конфигурации активных солнечных областей (групп пятен) в настоящее время является телескоп HMI, работающий на космическом аппарате SDO. Соответствующие данные представляют собой оптические изображения полного диска Солнца, а также карты магнитных полей,

на которых черным и белым цветом показаны области магнитного поля отрицательной и положительной полярности соответственно. Отрицательная полярность соответствует направлению поля от наблюдателя. Положительная – к наблюдателю.

Соответствующие данные предоставляются потребителям «как есть», как правило, с минимальной обработкой, состоящей в устранении фонового сигнала, а также в выравнивании чувствительности по полю зрения.

Рис. 1. Прохождение АО 3664 по диску Солнца с 01 по 12 мая 2024 года



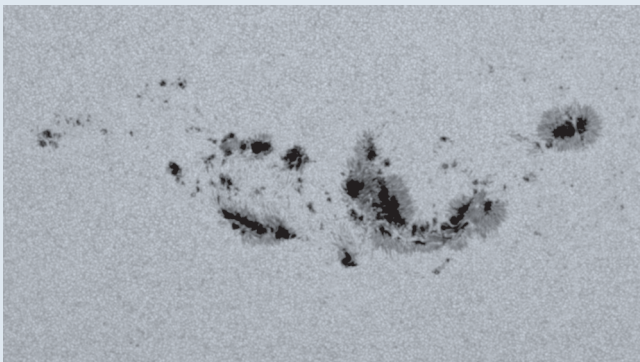


Рис. 2. Изображение
АО 3664 в момент
прохождения
центрального
солнечного меридиана
7 мая 2024 года

В настоящее время в отечественной орбитальной группировке отсутствуют приборы, способные предоставлять такие данные.

На рис. 1 демонстрируются изображения активной области, вызвавшей описываемые события. Номер активной области (АО) – 3664. Последовательно показаны 4 изображения, первое из которых (левое верхнее) получено 1 мая 2014 года вскоре после появления активного центра из-за восточного (правого) края Солнца, второе (правое верхнее) – 5 мая, при приближении центра к линии Солнце–Земля, третье (нижнее левое) – 9 мая, вскоре после прохождения областью центрального меридиана непосредственно перед серией описываемых событий, и последнее (нижнее правое) – 12 мая, в момент завершения событий. На последнем снимке область находится уже около западного правого края Солнца. Положение активного центра на всех снимках выделено рамкой.

На рис. 2 показано детальное изображение АО 3664 в момент прохождения центрального меридиана. Область представляла в этот момент крупную конфигурацию типа Beta-Gamma-Delta, состояла из 22 пятен, и имела общую площадь около 560 миллионов долей солнечной полусферы. В максимуме же (см. ниже) площадь

группы достигала 2400 единиц, что делает ее одной из крупнейших в современной истории наблюдений.

Если задаться вопросом, какие особенности данного активного центра могли привести к его экстремально высокой активности, то обращает на себя внимание очень быстрый рост площади группы, что видно даже при простом визуальном сравнении размера области на первой панели рис. 1, в момент ее появления на видимой стороне Солнца, и размера области на последующих снимках. Чтобы понять, как менялась площадь группы в исследованный период времени, мы приводим соответствующие данные на рис. 3. Полученные графики подтверждают особенно быстрый рост числа пятен и площади группы непосредственно перед событиями 11–13 мая 2024 года.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ, ПРЕДШЕСТВОВАВШИЕ ГЕОМАГНИТНЫМ СОБЫТИЯМ

Непосредственной причиной крупных геомагнитных явлений стала серия солнечных вспышек, произошедших в активной области 3664, значительная часть которых сопровождалась выбросами корональной массы. В настоящее время основным источником данных

Рис. 3. Изменение числа пятен и площади АО 3664 с 1 по 13 мая 2024 г.

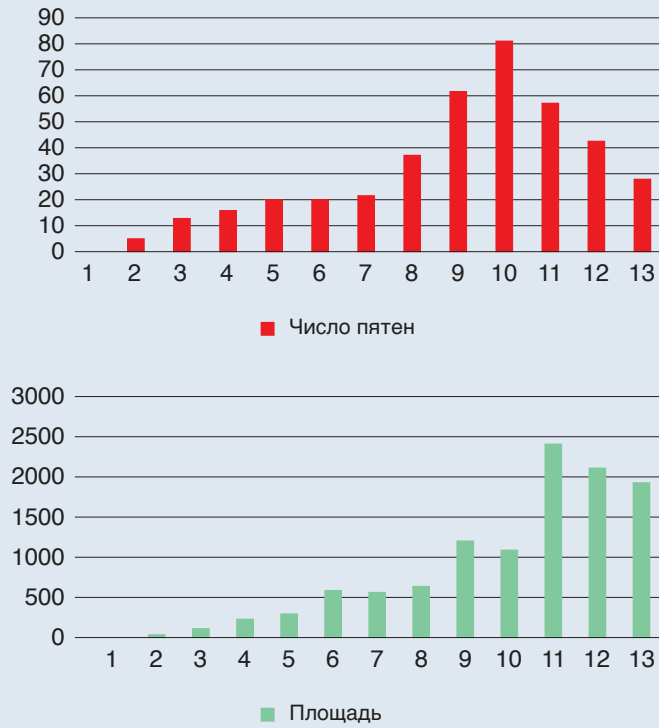


Таблица 1

Вспышки X класса в АО 3664

Время начала, УТ	Время максимума, УТ	Время окончания, УТ	Балл
2024-05-08 04:37:00	2024-05-08 05:09:00	2024-05-08 05:32:00	X1.0
2024-05-08 21:08:00	2024-05-08 21:40:00	2024-05-08 23:10:00	X1.0
2024-05-09 08:45:00	2024-05-09 09:13:00	2024-05-09 09:36:00	X2.2
2024-05-09 17:23:00	2024-05-09 17:44:00	2024-05-09 18:00:00	X1.1
2024-05-10 06:27:00	2024-05-10 06:54:00	2024-05-10 07:06:00	X3.9
2024-05-11 01:10:00	2024-05-11 01:23:00	2024-05-11 01:39:00	X5.8
2024-05-11 11:15:00	2024-05-11 11:44:00	2024-05-11 12:05:00	X1.5
2024-05-12 16:11:00	2024-05-12 16:26:00	2024-05-12 16:38:00	X1.0
2024-05-14 02:03:00	2024-05-14 02:09:00	2024-05-14 02:19:00	X1.7
2024-05-14 12:40:00	2024-05-14 12:55:00	2024-05-14 13:05:00	X1.2
2024-05-14 16:46:00	2024-05-14 16:51:00	2024-05-14 17:02:00	X8.7
2024-05-15 08:18:00	2024-05-15 08:37:00	2024-05-15 08:55:00	X3.5

о баллах солнечных вспышек является группировка космических аппаратов GOES, измеряющая потоки мягкого рентгеновского излучения Солнца. Основным источником ВУФ изображений Солнца является телескоп AIA на КА SDO.

В таблице 1 приведен список солнечных вспышек класса X, произошедших в области 3664 в период с 1 по 13 мая 2024 года. Времена вспышек показаны в формате всемирном времени UT.

Можно отметить, что вспышки высшего уровня X начались в активной области только начиная с 8 мая 2024 года, хотя группа пятен существовала на солнечном диске с 1 мая. Можно отметить в этой связи, что именно в этот период, согласно рис. 3, произошло особенно резкое увеличение площади и количества пятен в группе.

Всего в области с 8 по 15 мая произошло 12 вспышек высшего балла. Среди них особенно можно отметить вспышку X8.7 от 14 мая, которая стала крупнейшей с 2017 года, а также вспышку X5.8 от 11 мая, занимавшая на тот момент третью позицию в списке самых крупных вспышек текущего, 25-го солнечного цикла. На рис. 4 показаны профили рентгеновского излучения Солнца на 8–9 мая (первая панель), 10–11 мая (вторая панель), 12–13 мая (третья панель) и 14–15 мая (четвертая панель).

Заметим, что основной причиной геомагнитного шторма 11–13 мая стали, судя по всему, не самые крупные вспышки, наблюдающиеся на двух последних панелях, а серия почти непрерывных вспышек высокого M и низкого X уровня, наблюдавшаяся 8 и 9 мая, а также вспышка X3.9 от 10 мая. Две наиболее крупные вспышки, X5.8 и X8.7 произошли уже после ухода АО 3664 с гелиоэффективных долгот

и, по сути, влияния на геомагнитную ситуацию не оказали.

На рис. 5 показаны снимки полного диска Солнца в спектральной линии 094 А, полученные в момент двух солнечных вспышек 8 и 9 мая. На левой панели показана вспышка уровня X1.0 с максимумом около 21:40 UT. Правая панель – вспышка уровня X2.2 с максимумом около 09:13 UT. Обе вспышки входят в число событий, ставших причиной геомагнитной бури 11–13 мая 2024 года.

ИНФОРМАЦИЯ О ВЫБРОСАХ КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ, ВЫЗВАВШИХ ГЕОМАГНИТНЫЕ СОБЫТИЯ

Солнечные корональные выбросы массы являются основным фактором солнечно-земных связей, оказывающем наибольшее воздействие на магнитное поле Земли. Основным способом регистрации корональных выбросов массы являются коронографические наблюдения внешних областей Солнца. Выбросы видны в рассеянном оптическом свете, т. е. за счет их «подсветки» обычным оптическим излучением Солнца. Рассеивание осуществляется свободными электронами. Собственное излучение выбросов крайне мало, хотя и обсуждаются проекты по регистрации выбросов в линиях собственного излучения. В настоящее время основным источником таких данных является коронограф LASCO, работающий на европейском спутнике SOHO.

Прибор LASCO предоставляет 2 основных типа данных, а именно снимки ближней внутренней короны Солнца (так называемый канал C2), в котором видны ранние стадии выброса, а также снимки внешней короны Солнца (канал C3), в котором видно распространение выброшенных масс

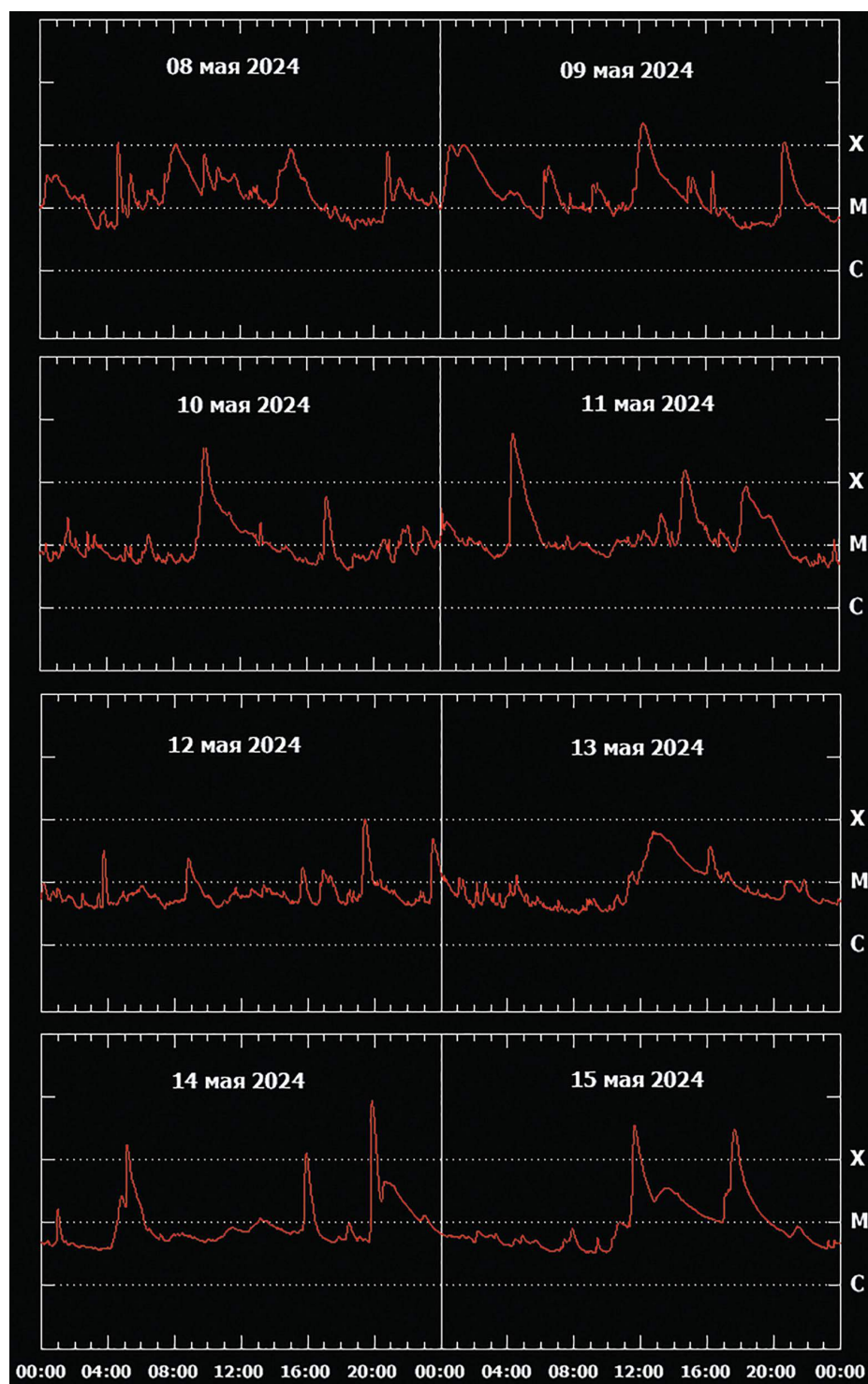


Рис. 4. Солнечные вспышки 8–15 мая 2024 г.

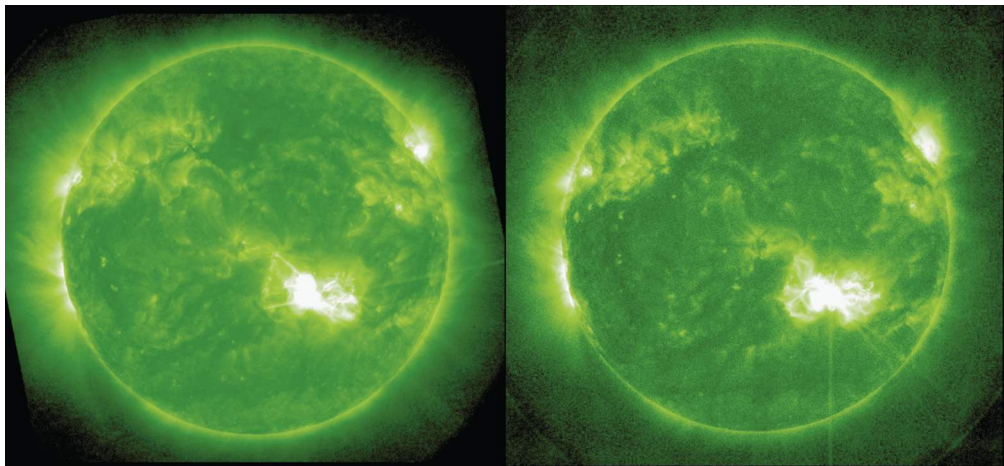


Рис. 5. Примеры ВУФ изображений солнечных вспышек, вызвавших магнитные бури 11–13 мая 2024 г.

вещества на значительных расстояниях. Для гелиофизического прогноза обычно используется канал С3, а для раннего оповещения – канал С2.

В таблице 2 приведен список всех выбросов массы, которые можно было обнаружить с 8 по 12 мая на изображениях коронографа С3. Времена выброса приведены по примерному моменту его появления в поле зрения прибора С3.

Таким образом, с 8 по 11 мая за 4 дня было произведено не менее 7 корональных выбросов массы типа «гало», т. е. направленных на Землю.

Ниже, на рис. 6 приведены изображения 6 из 7 событий данного типа, произошедших с 8 по 10 мая. Выбросы показаны, когда вещество уже удалилось от Солнца, т. е. на более поздних стадиях, чем указано в таблице 2.

Таблица 2

Выбросы массы с Солнца с 8 по 12 мая 2024 г.

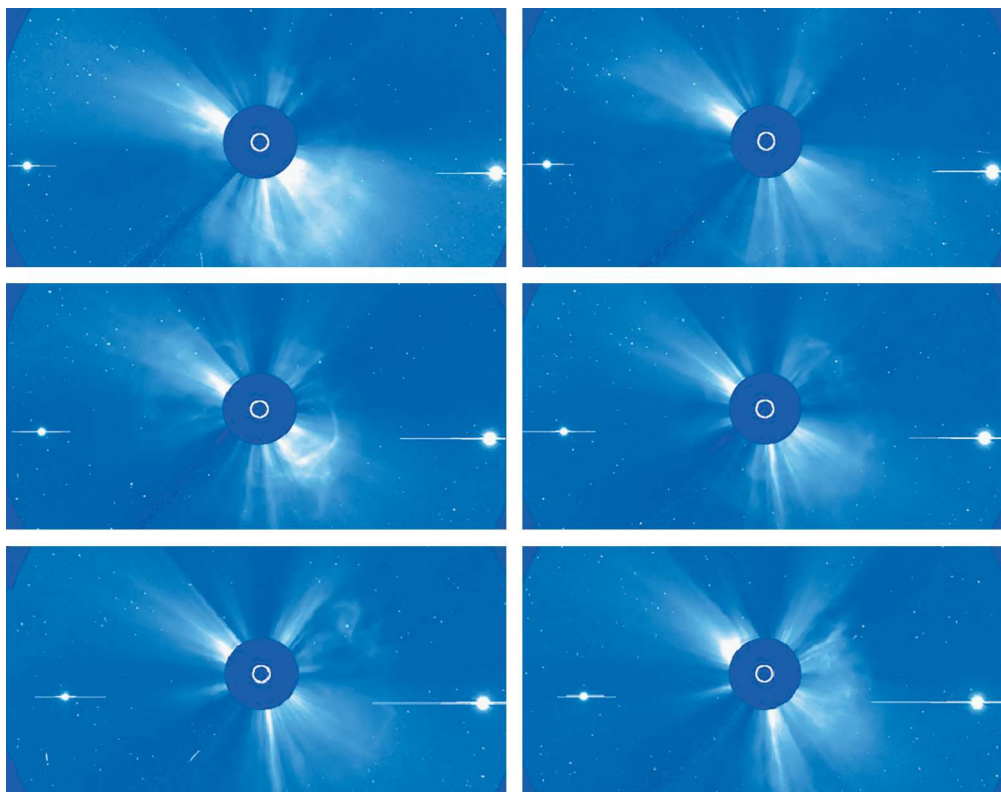
Время выброса, UT	Тип	Прибор
2024-05-08 05:42:00	гало	С3
2024-05-08 13:06:00	гало	С3
2024-05-08 23:10:00	гало	С3
2024-05-09 09:42:00	гало	С3
2024-05-09 18:58:00	гало	С3
2024-05-10 07:42:00	гало	С3
2024-05-11 01:54:00	гало	С3
2024-05-11 16:54:00	близкий к гало	С3
2024-05-12 04:30:00	близкий к гало	С3

В целом видно, что даже в белом свете выбросы массы являются весьма слабо-эмиссионными объектами, но тем не менее уверенно выделяются на фоне неба методами цифрового анализа. Основным научным результатом, извлекаемым из соответствующих изображений, является информация о направлении выброса и его скорости. Соответствующие данные получаются в предположении о некоторой заданной форме выброса, которая обычно предполагается сферической, опирающейся на конусообразное основание (модель CONE). Модель, в то же время, пока дает много ошибок и в перспективе требует улучшения.

МОДЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВЫБРОСОВ КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ

Особенностью современного прогноза и в целом современных гелиофизических продуктов является практически полная невозможность получения экспериментальных данных о движении выброса массы к Земле, начиная с момента его ухода из поля зрения коронографа C3 до момента прохода плазмой точки L1 системы Солнце–Земля, где становится возможным ее прямое детектирование. По этой причине в современных продуктах получили

Рис. 6. Выбросы корональной массы типа «гало» с 8 по 10 мая 2024 г. – причина экстремальных геомагнитных событий на Земле 11–13 мая



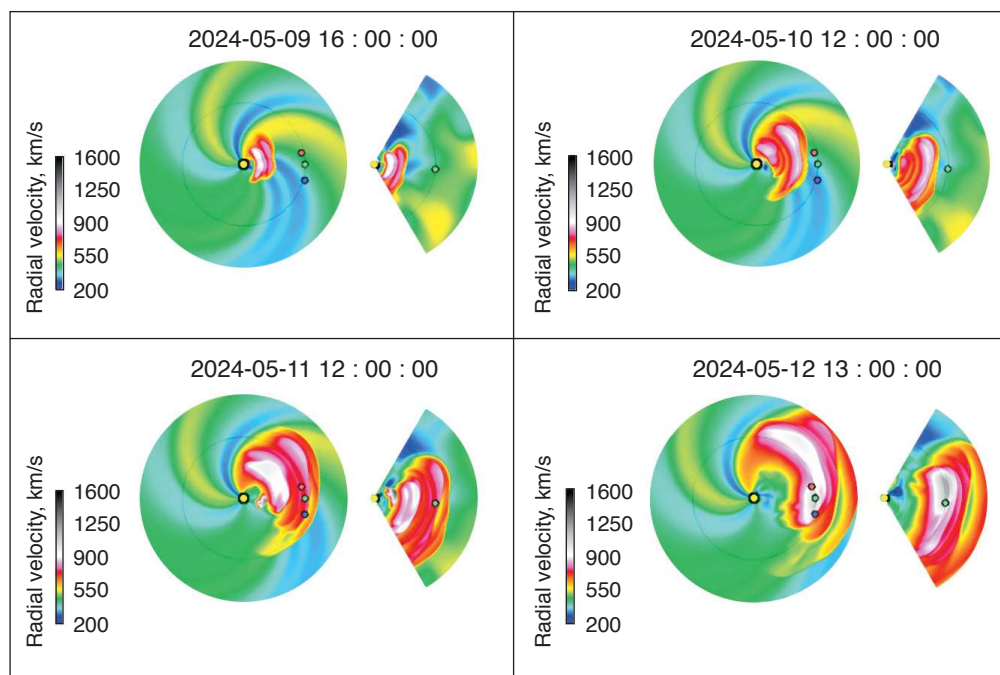


Рис. 7. Модельный расчет распространения выбросов массы типа «гало», произошедших с 8 по 11 мая 2024 г.

широкое распространение методы моделирования движения плазмы от Солнца к Земле, основанные на решении систем гидродинамических уравнений. В настоящее время наиболее широко распространенным кодом для решения данной задачи является код ENLIL.

Ниже, на рис. 7 показаны результаты соответствующих расчетов для выбросов массы типа «гало», произошедших в период с 08 по 11 мая 2024 года (см. табл. 2 и рис. 6). Показаны 4 последовательные стадии распространения солнечного вещества.

В данном конкретном случае модель вполне корректно описала исключительный характер события, когда множество (не менее 7) корональных выбросов массы было выброшено к Земле в течение короткого интервала времени. Наиболее существенной ошибкой

модели для данного конкретного события была неправильная оценка все тех же тангенциальных составляющих скорости для выбросов 10 и 11 мая, что привело к не вполне корректному геомагнитному прогнозу на 12–13 мая. В то же время принципиальных грубых ошибок модель в приложении к описываемым событиям не дала. Ниже мы показываем прогноз, который был выдан, а также фактическую ситуацию.

ПРОГНОЗ И ФАКТИЧЕСКАЯ СИЛА ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ

На рис. 8 показан прогноз геомагнитных событий на 9–11 мая (первая панель) и 12–14 мая (вторая панель). Второй прогноз был выпущен уже после начала геомагнитного шторма, т. е. учитывал фактическую ситуацию.

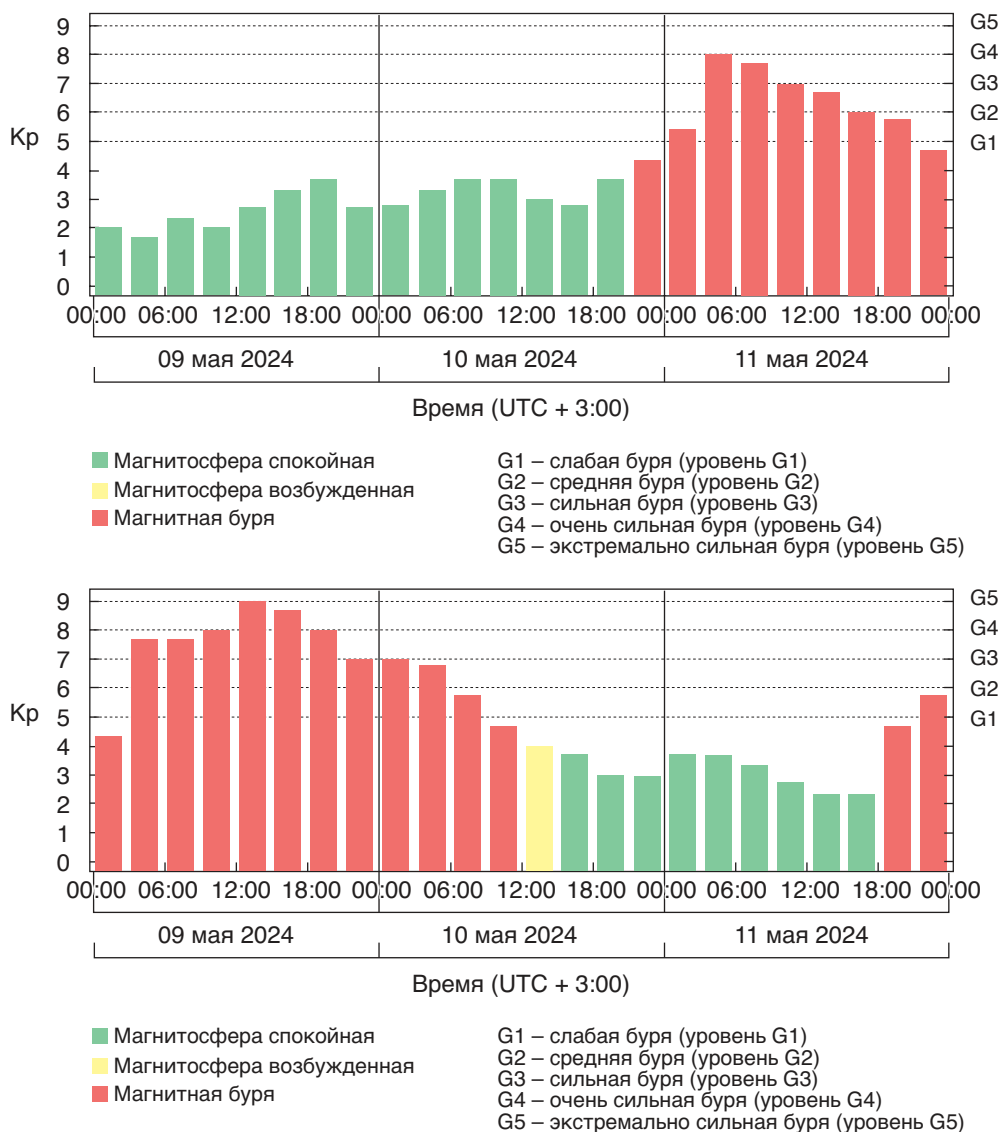
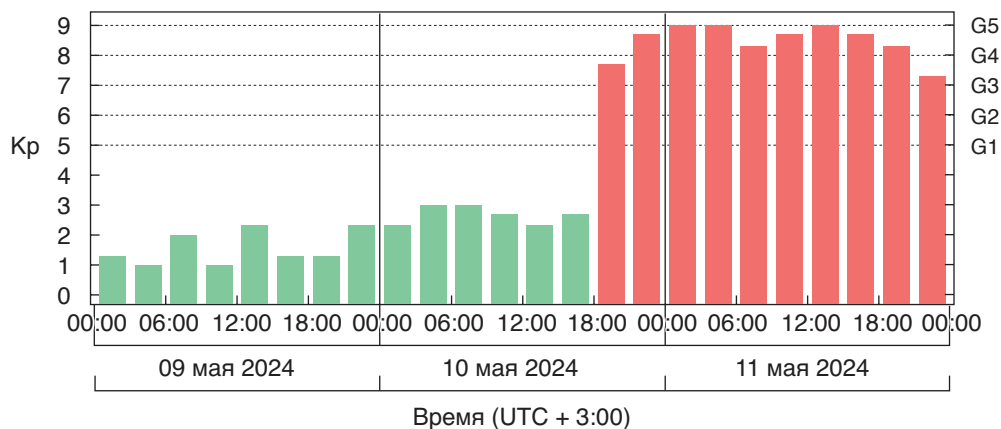


Рис. 8. Геомагнитный прогноз на 9–14 мая, сформированный по модели ENLIL

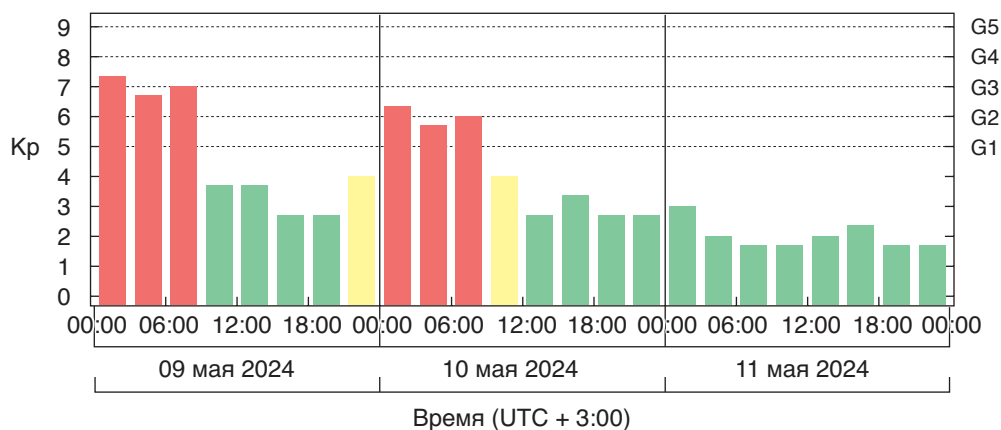
Можно заметить, что по состоянию на 10 мая 2024 года прогноз был выдан на магнитную бурю уровня G4. Событие уровня G5 на тот момент не предполагалось.

Фактическая геомагнитная ситуация за те же даты приведена на рис. 9. Видно, что в прогнозе был занижен геомагнитный балл на 11 мая. Прогно-

зировался максимальный уровень G4, тогда как по факту произошло 3 пика уровня G5. И наоборот, оказался значительно завышен прогноз на 12 мая, когда ожидался уровень G5, а по факту максимальное значение составило G3. В целом, как уже говорилось, ошибки были связаны с некорректным учетом тангенциального движения выбросов,



- Магнитосфера спокойная
- Магнитосфера возбужденная
- Магнитная буря
- G1 – слабая буря (уровень G1)
- G2 – средняя буря (уровень G2)
- G3 – сильная буря (уровень G3)
- G4 – очень сильная буря (уровень G4)
- G5 – экстремально сильная буря (уровень G5)



- Магнитосфера спокойная
- Магнитосфера возбужденная
- Магнитная буря
- G1 – слабая буря (уровень G1)
- G2 – средняя буря (уровень G2)
- G3 – сильная буря (уровень G3)
- G4 – очень сильная буря (уровень G4)
- G5 – экстремально сильная буря (уровень G5)

Рис. 9. Фактические значения индекса Kp с 9 по 14 мая 2024 г.

из-за чего они пришли в смещенном состоянии относительно прогноза. В первом случае, 11 числа, к Земле пришли более плотные области, чем предполагалось, а во втором случае, наоборот, менее плотные периферийные участки.

В целом, можно сделать вывод, что события мая 2024 года вписываются в общую систему современных представлений о физике солнечно-земных связей. Причиной события стало формирование на диске Солнца исключительно крупной активной области

сложной магнитной конфигурации. Наиболее интенсивное высвобождение энергии в области приблизительно совпало с периодом наиболее быстрого роста площади наблюдающихся здесь групп пятен, что также соответствует современным представлениям о корреляции между площадью активных областей и запасами свободной магнитной энергии в этих центрах. Из особенностей конкретного события следует отметить, что геомагнитная буря высшего балла явилась причиной не одной-двух исключительно сильных вспышек, как это часто случается, а стала реакцией на продолжительную серию вспышек средней силы, каждая из которых сопровождалась выбросом массы. Такой сценарий, насколько

можно судить, ранее не описывался. Также следует отметить, что, хотя постфактум событие и охарактеризовано как объяснимое, заблаговременный прогноз на него был выдан только примерно за сутки до события. Еще за неделю до произошедшей серии вспышек и бурь никаких предвестников будущих событий не наблюдалось и в прогнозе они не фигурировали. В целом, события хорошо показывают объективные возможности и точность современного прогноза космической погоды, которые могут быть охарактеризованы как пока ограниченные. Также следует отметить существенную зависимость прогноза от наличия доступа к зарубежной гелиофизической информации.



НАУКА

— 1727 —

ПОДПИШИТЕСЬ
НА ЖУРНАЛЫ
ИЗДАТЕЛЬСТВА
«НАУКА»

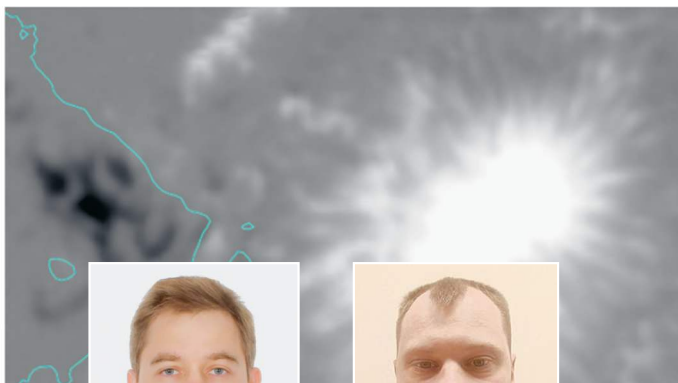
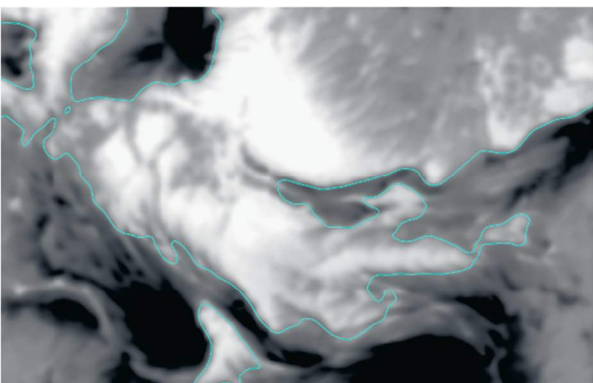
печатные и электронные версии



Отдельные номера журналов можно купить

- в интернет-магазине **NAUKABOOKS.RU**
- в магазине «Академкнига»
по адресу: г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
- по электронной почте (e-mail) journals@naukapublishers.ru
- по телефону +7 (495) 276-77-35

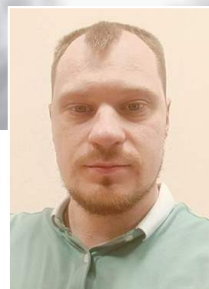
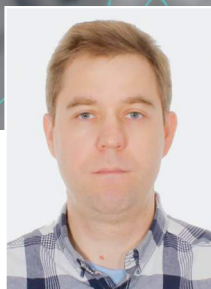
СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ, ПРОИЗОШЕДШИЕ В МАЕ 2024 ГОДА: БЫЛ ЛИ ВОЗМОЖЕН ПРОГНОЗ?



ЗИМОВЕЦ Иван Викторович,
кандидат физико-математических наук

ШАРЫКИН Иван Николаевич,
кандидат физико-математических наук
Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/50044394824060021



Поступила в редакцию: 23.09.2024
Принята к публикации: 23.09.2024

Технологический прогресс и развитие науки исторически были неразрывно связаны с освоением человеком природных стихий. Путешествия – по суше, воде, а потом и по воздуху – требовали не только постоянного усовершенствования транспортных средств, но и умения прогнозировать погоду, состояние моря, состояние атмосферы на разных высотах.

Вынужденное соседство с вулканами приводило сначала к эмпирическому поиску примет, а потом и научно обоснованных прогностических критериев грозящих извержений. Будучи свидетелями долгой засухи, люди постепенно научились оценивать вероятность пожаров и их последствий для урожая.

Ряд подобных примеров можно продолжить, но нам бы хотелось заострить внимание на дне сегодняшнем и поговорить о том, что можно узнать об угрожающих человечеству стихиях, вооружившись современными достижениями науки и технологии.

Сейчас, в эпоху освоения (пусть пока только автоматическими роботизированными комплексами) околоземного и дальнего космического пространства Солнечной системы и использования космического пространства для задач связи и для высокоточного дистанционного зондирования Земли, необходимо уметь оценивать состояние этого пространства, которое, как оказывается, тоже подвержено изменениям и даже бурным «штормам». Более того,

состояние космического пространства – космическая погода – оказывает как прямое так и косвенное влияние на геосферу и технологическую инфраструктуру человечества и во многом определяется процессами, происходящими на Солнце. Одной из ключевых проблем космических исследований является разработка методов прогноза космической погоды.

Межпланетное космическое пространство не является пустотой, вакуумом в идеальном смысле. Оно заполнено плазмой, т. е. смесью различных ионов и электронов, которые взаимодействуют с межпланетным магнитным полем, формирующимся за счет магнитного поля Солнца. Плазма не находится в равновесии, а постоянно движется от Солнца, становясь солнечным ветром, состояние которого (скорость, плотность, магнитное поле и др.) в разных местах Солнечной системы определяет воздействие на планетные магнитосферы, ионосферы и атмосферы, а также на космические аппараты. Можно сказать, что прогнозирование состояния солнечного ветра и является главной задачей науки о космической погоде, однако это утверждение на поверку оказывается слишком простым и поспешным, умаляющим реальную проблему.

Дело в том, что процессы в солнечном ветре крайне нестационарны, другими словами, параметры среды меняются на разных интервалах времени в разных точках пространства по достаточно сложным закономерностям. Причины этих изменений различны: разные источники плазмы и магнитного поля солнечного ветра, волны разных типов в ветре (аналогично волнам на воде или в воздухе), а также некоторые катаклизмы взрывного характера, связанные с процессами на Солнце.

В этой статье мы не будем обсуждать все богатство физических процес-

сов в солнечном ветре и способы прогнозирования его состояния. Сделаем акцент на катастрофических явлениях на Солнце, которые наиболее сильно влияют на параметры плазмы Солнечной системы. Речь пойдет о солнечных вспышках и возможностях их прогноза. Наш рассказ будет опираться на ярчайший пример серии солнечных вспышек, произошедших в мае 2024 г., и приведших к одному из самых мощных геомагнитных штормов на Земле.

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ, СОПУТСТВУЮЩИЕ ЯВЛЕНИЯ, ВЛИЯНИЕ НА КОСМИЧЕСКУЮ ПОГОДУ

Определить солнечную вспышку можно разными способами. Например, какому-нибудь астрофизику-теоретику кажется, что лучше определить вспышку, зная ее физический механизм, а астроному-наблюдателю по нраву указать на видимые проявления солнечных вспышек.

Обратимся к наиболее лаконичному определению солнечной вспышки. Авторам этой статьи представляется удачным определение из Физической энциклопедии под ред. Прохорова (том. 1, стр. 350, М.: «Советская энциклопедия», 1988): «Вспышка на Солнце – нестационарный процесс в атмосфере Солнца, представляющий собой самое мощное из всех проявлений солнечной активности». Заметим, что данное определение рассматривает именно самые крупные солнечные вспышки, во время которых может выделяться энергия в виде излучения до 10^{26} Дж (примерно миллиард водородных бомб!). Тем самым подчеркивается важность данного явления с точки

зрения космической погоды. При этом в реальности вспышки на Солнце могут иметь разные масштабы энерговыделения, вплоть до «нановспышек» и даже «пиковвспышек» (см. статью Богачёва и др. в ЗиВ, № 4, 2021). У нас разговор пойдет о самых крупных событиях на Солнце, которые следует прогнозировать с целью оценки эффектов космической погоды.

Изначально вспышки были открыты с помощью оптических телескопов, но на сегодняшний день их характеризуют по наблюдениям рентгеновского излучения. Каждой вспышке принято давать рентгеновский класс или балл, соответствующий максимальному (пиковому) потоку энергии (измеряемой в Вт/м²) за время вспышки в определенном диапазоне длин волн. Так, вспышка считается умеренной с классом М, если пиковая мощность лежит в диапазоне от 10⁻⁵ до 10⁻⁴ Вт/м². Для слабой вспышки класса С диапазон потоков составляет от 10⁻⁶ до 10⁻⁵ Вт/м². Поток энергии обычно определяют с помощью данных наблюдений стандартных рентгеновских детекторов в диапазоне длин волн от 1 до 8 Å (ангстрем) на спутниках серии GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) на геостационарных орбитах. Мощные вспышки класса Х начинаются от пикового потока 10⁻⁴ Вт/м² и выше. Например, если регистрируется вспышка класса Х3.6, то это означает, что в ее пике был зафиксирован поток рентгеновского излучения, равный 3.6×10^{-4} Вт/м², а если класс Х17.3, то ее пиковый поток достигает 17.3×10^{-4} Вт/м². Класс Х – это самый верхний класс. Известно, что мощные вспышки класса Х в среднем сопровождаются наиболее сильными возмущениями солнечного ветра, планетных магнитосфер и атмосфер.

Мощные вспышки в типовом случае сопровождаются излучением в широчайшем диапазоне электромагнитно-

го спектра (от радиоволн до гамма-лучей), нагревом плазмы до десятков миллионов К, скоростными течениями вещества до тысяч км/с и волновыми движениями (см. статью Накарякова и др. ЗиВ, 2022, № 1), ускорением электронов и ионов до скоростей, близких к световой, а также крупномасштабными выбросами плазмы, называемыми корональными выбросами массы (КВМ), в межпланетное пространство (со скоростями примерно до 3000 км/с).

Указанные физические эффекты и определяют экстремальное состояние космической погоды в условиях крупных вспышек. Основные проявления такого состояния – это, во-первых, ионизирующее рентгеновское и ультрафиолетовое излучение, во-вторых, корпускулярная радиация (ускоренные электроны и ионы) и, в-третьих, крупномасштабные «облака» плазмы с магнитным полем корональных выбросов. В последнем случае наблюдаются мощнейшие возмущения магнитосфер планет: в частности, на Земле мы фиксируем геомагнитные бури, сопровождаемые полярными сияниями.

Прогноз вспышек в первую очередь предполагает оценку времени проявления крупного события, его вероятный рентгеновский класс и возможное влияние на космическую погоду по трем вышеперечисленным аспектам. Для того чтобы понять, каким образом в современной науке прогнозируются солнечные вспышки, необходимо рассмотреть физический механизм явления и определить основные факторы, приводящие к «катастрофе» на Солнце.

О МЕХАНИЗМЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Начнем рассказ о механизме вспышек издавна. Представим себе качели. Известно, что в обычном состоянии

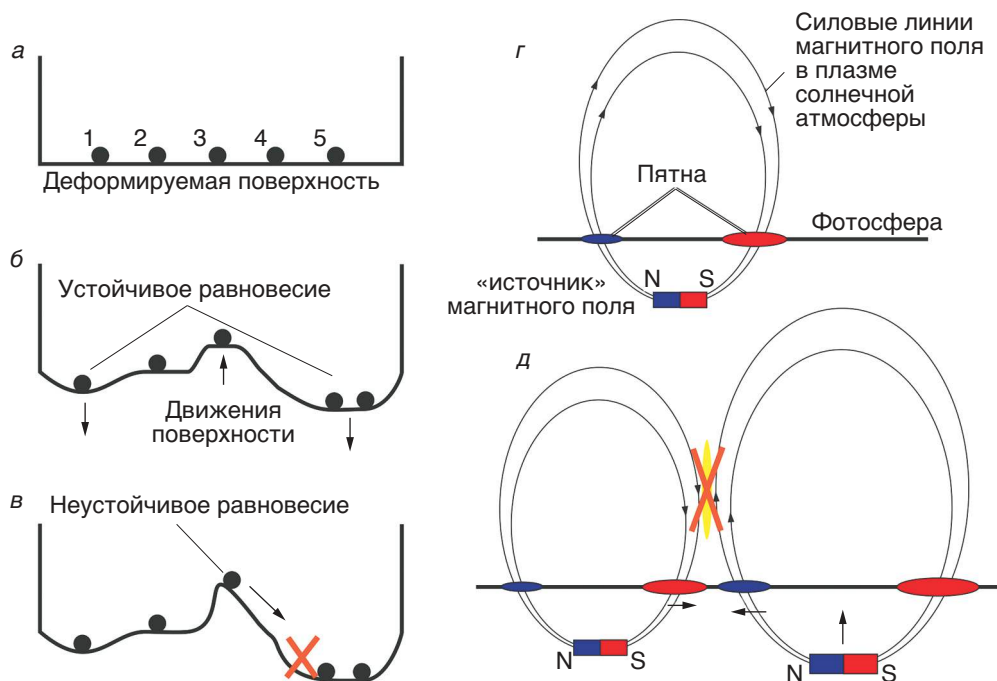


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая механизм солнечной вспышки. Слева показана механическая аналогия (а–в). Справа показана схема структуры магнитных полей и пятен на Солнце в устойчивом случае (г) и неустойчивом (д), продуцирующем вспышки. Для простой биполярной группы пятен (г) структура магнитного поля в солнечной атмосфере моделируется постоянным магнитом, погруженным под солнечную фотосферу («источник» магнитного поля – магнитный диполь). Красным и синим цветами показаны пятна, в которых магнитное поле входит внутрь Солнца и выходит из него соответственно (т. е. пятна противоположных магнитных полярностей). Силовые линии противоположных направлений от разных источников могут приближаться друг к другу (д, желтая область) за счет движения пятен и источников под фотосферой (черные стрелки)

качели испытывают малые маятниковые колебания вблизи нижнего положения равновесия. Данную ситуацию называют устойчивым равновесием. Другими словами, при небольших возмущениях качели все равно будут приходить в состояние малых колебаний около нижнего положения. Однако существует положение неустойчивого равновесия: перевернутые качели в верхней точке. В такой ситуации даже очень малые возмущения непременно приведут к опрокидыванию конструкции в положение устойчивого равновесия. Ситуацию можно изменить, добав-

ля дополнительные усложнения конструкции.

Устойчивость и неустойчивость являются универсальными понятиями (свойственными не только этим простым качелям), которые применяются к самым разнообразным физическим системам, в том числе к жидкостям, газам, а также к замагниченной плазме (как на Солнце).

В примере с качелями потенциальная энергия этой системы в верхнем положении начинает переходить в кинетическую энергию при опрокидывании качелей. Рассмотрим более

сложную механическую аналогию, своего рода мысленный эксперимент, в котором просматривается общий принцип прогноза некоторого выделения энергии, запасенной за счет внешней работы.

Пусть в начальном состоянии имеет-ся ящик со стенками, на дне которого расположено пять одинаковых шариков. Пусть в этой системе учитывается трение, и следовательно, любые спровоцированные движения шариков будут угасать. Пусть поверхность, на которой изначально покоятся шарики, является деформируемой (например, фольга). Далее к разным точкам поверхности прикладываются некоторые силы, и она начинает менять свою форму: некоторые участки поднимаются, а другие опускаются, формируя области неустойчивого и устойчивого равновесия соответственно. В результате часть шариков оказываются в ямках, т. е. в относительно устойчивом положении, а часть на плоских поверхностях или даже на возвышенностях. При дальнейшей деформации тот шарик, который оказался на возвышенности, оказывается на самом пике горки, т. е. в неустойчивом равновесии, и сваливается в ямку к другим уже находящимся там шарикам. И тогда в ямке происходит ряд соударений и движений трех шариков. Эта ситуация иллюстрирует переход запасенной потенциальной энергии одного шарика в кинетическую энергию трех шариков.

Множественно увеличивая количество шариков в этом мысленном эксперименте, можно прийти к качественно-му пониманию сплошной среды: жидкости, газа или плазмы. Отслеживая форму поверхности и ее динамику, мы в состоянии спрогнозировать момент срыва системы в неустойчивость и даже оценить соответствующую энергию. Интуитивно понятно, что аналогичный принцип может быть применен

и к солнечным вспышкам. Главное – разобраться, что выступает в роли «шариков», а что в роли деформируемой за счет внешних сил «поверхностью». При этом важно обратить внимание, что в атмосфере Солнца плазма бывает в очень разных физических условиях и, в отличие от чисто механических систем, здесь добавляются законы электродинамики, усложняющие описание процессов.

В настоящий момент известно, что природа солнечной активности кроется в особенностях солнечного магнетизма, который связан с механизмом динамо. Солнечная активность волнообразна, что проявляется в виде циклической зависимости количества пятен, вспышек, выбросов плазмы и других явлений на Солнце с периодом около 11 лет (циклы Швабе). Максимум текущего цикла солнечной активности (25-го по счету начиная с 1755 г.) ожидается в 2024–2025 гг. Мы не будем вдаваться в физику 11-летнего цикла солнечной активности (см. статью Кацовой и Соколова в ЗиВ, 2021, № 3), а лишь отметим, что в результате глобального динамо образуются группы пятен на самом нижнем наблюдаемом уровне атмосферы Солнца (фотосфере). С ними ассоциируются активные области, где и регистрируются мощные солнечные вспышки (классов М и X, а также и более низких классов). Неустойчивости плазмы в магнитном поле в окрестности пятен провоцируют развитие вспышек. Далее приведем наиболее простое, не количественное, но качественное описание этой ситуации.

Пятна являются местом выхода сильного магнитного поля из-под фотосферы в вышележащие слои Солнца – хромосферу и корону. Ограниченный объем пространства над локализованной группой пятен называется активной областью. В качестве примера

рассмотрим простую биполярную группу пятен. Данная конфигурация с точки зрения физики плазмы достаточно устойчивая (тут читателю придется поверить авторам на слово). Неустойчивость может иметь место, когда возникает усложнение структуры магнитного поля: появление (всплытие из более глубоких слоев) дополнительных источников (других «магнитов»), а также перемежаемость полярностей пятен и их взаимное движение.

Кроме того, может возникнуть ситуация, когда силовые линии противоположных направленностей от разных источников приближаются друг к другу за счет движения пятен и источников под фотосферой. Данная конфигурация неустойчива, и происходит процесс так называемого магнитного пересоединения, в результате которого имеют место все вышеперечисленные физические процессы, сопровождающие вспышку: нагрев плазмы, ускорение заряженных частиц и движения (выбросы) плазмы. В локальной области, где происходит магнитное пересоединение, магнитные потоки с противоположным знаком взаимодействуют друг с другом, что приводит к уменьшению энергии магнитного поля. Не оказавшись в этой области плазмы, а только вакуум, произошла бы аннигиляция магнитного поля, и мы бы практически не увидели последствий. Но поскольку на Солнце есть плазма, то ей очень быстро (за минуты и даже секунды земного времени) передается энергия магнитного поля. В результате эти «разгоряченные» частицы излучают фотоны света во всем спектре: гамма и рентгеновские лучи, ультрафиолет, оптическое излучение (видимый свет), инфракрасные лучи и радиоволны.

В этой статье мы не можем более подробно объяснять физику магнитного пересоединения в силу сложности процесса и необходимости знания кур-

са физики плазмы (желающие могут заглянуть в статью Леденцова и Сомова, опубликованную в *ЗиВ*, 2021, № 4). На вышеприведенном примере мы только показали типичную неустойчивость замагниченной плазмы активной области, приводящую к вспышке.

Таким образом, для прогноза солнечных вспышек аналогом искривляемой поверхности под шариками выступают следующие характеристики: структура магнитного поля, форма группы пятен, их взаимное расположение и движения друг относительно друга внутри группы. Если отследить характерные конфигурации пятен и их движения, приводящие к неустойчивости типа магнитного пересоединения, то окажется возможным прогнозировать солнечные вспышки. Далее мы рассмотрим, каким конкретным образом можно осуществлять такой прогноз.

КОРОТКО О СУТИ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ВСПЫШЕК

Прогнозирование солнечных вспышек – сложная задача, что обусловлено рядом факторов. С одной стороны, до сих пор нет полного понимания процессов, происходящих в активных областях (т. е. в группах пятен) перед вспышками и во время вспышек. Эти процессы очень сложные и комплексные. Происходят они одновременно на пространственных масштабах от сантиметров до сотен тысяч километров. С другой стороны, хотя Солнце и ближайшая к нам звезда, оно все же располагается далеко от Земли (около 150 млн км), и даже самые современные наблюдения не дают полной картины процессов, происходящих в активных областях. Несмотря на развитие наблюдательной базы, пока нет возможности систематически с желаемой точностью измерять все необ-

ходимые физические параметры (например, векторы магнитного и электрического поля, термодинамические параметры плазмы) в активных областях над солнечной поверхностью (фотосферой), там, где происходит основное энерговыделение вспышек. По этим причинам в настоящее время не удается построить полноценные физически обоснованные количественные модели развития активных областей и происходящих в них вспышек в реальном времени. Следовательно, мы пока не можем с желаемой точностью спрогнозировать конкретную солнечную вспышку. Иными словами, мы не можем определить заблаговременно (хотя бы на несколько часов вперед), что в заданном интервале времени в заданной области на Солнце произойдет вспышка с такими-то определенными характеристиками (пиковой мощностью, например X3.6, длительностью, спектральными особенностями, будет ли она сопровождаться выбросом плазмы определенной массы в определенном направлении и пр.).

Несмотря на указанные трудности, в ходе многолетних наблюдений было установлено, что некоторые активные области производят много вспышек, другие поменьше, а в некоторых вообще почти не бывает вспышек. Опытным путем исследователи определили некоторые признаки (или характеристики) активных областей, при которых вспышки происходят с более высокой вероятностью. Основная часть этих характеристик определяется на основе наблюдений активных областей в оптическом диапазоне спектра, по наблюдениям непосредственно за группами солнечных пятен и связанных с ними распределений магнитных полей на фотосфере. Известны некоторые признаки предвспышечной ситуации и в других спектральных диапазонах, например в радиоволнах, ультра-

фиолетовом и рентгеновском диапазонах спектра.

До недавнего времени вспышечные признаки активных областей искали либо «на глаз», исходя из опыта исследователей (аналогично поискам примет тех или иных погодных условий на Земле, например, грозы или ливня), либо применяли статистические методы к значительным, но все же сильно ограниченным выборкам активных областей и вспышек.

В последние годы бурно развиваются подходы с применением машинного обучения для огромных баз данных, объемом в сотни и тысячи ТБ (терабайт), анализ которых отдельным человеком или небольшим исследовательским коллективом невозможен. Про применение методов машинного обучения в солнечной физике можно прочесть в статье Илларионова и Садыкова (ЗиВ, 2021, № 4). Мы же далее рассмотрим несколько наиболее традиционных и простых подходов прогнозирования вспышек – метод, основанный на классификации П. Макинтоша и метод, основанный на критериях В.Н. Ишкова – и покажем, как их можно применить к примечательной серии солнечных вспышек мая 2024 г.

СЕРИЯ ВСПЫШЕК, ПРОИЗОШЕДШИХ В МАЕ 2024 г.

В первой половине мая 2024 г. на Солнце наблюдался очень мощный всплеск активности. За период с 1 по 15 мая на видимой стороне Солнца произошло 226 вспышек трех верхних классов: 98 вспышек класса C, 110 вспышек класса M и 18 вспышек класса X. Это самая интенсивная серия вспышек, по крайней мере, за последние три солнечных цикла 23–25 (т. е. с 1996 г.).

Сравним два периода времени с разной вспышечной активностью по дан-

ным наблюдений GOES: 8–27 апреля (небольшое количество вспышек класса М) и 28 апреля – 17 мая (очень много мощных вспышек классов М и Х). Так, за время с 1 по 15 мая на солнечном диске наблюдалось около 25 активных областей (групп пятен), однако 84% всех вспышек серии произошли только в двух чрезвычайно активных областях с порядковыми номерами 13663 и 13664.

Первая вспышка класса Х произошла 8 мая в огромной активной области 13664. Наиболее мощная вспышка из рассматриваемой серии, имевшая внушительный класс Х8.7, произошла 14 мая в активной области 13664, когда та уже почти скрылась за краем солнечного диска. Через день для нас эта серия вспышек закончилась, поскольку Солнце повернулось к нам другим боком.

Далее покажем некоторые наблюдения этой активной области 13664 в сравнении с активной областью 13666, проходящей в то же время по солнечному диску, но в которой мощные вспышки не происходили, а также разберем несколько простейших методов прогноза вспышек на примере рассматриваемой серии вспышечных событий и обсудим, каким образом и насколько точно их можно было спрогнозировать.

События мая 2024 г. уже, конечно, тщательно изучены. Но в этой статье они нам интересны именно тем, что на них можно отработать методы прогнозирования и, по факту уже произошедшего, оценить, насколько эффективны эти методы. Это своего рода методологическая, но очень полезная задача.

Какими наблюдательными данными будем пользоваться? Для анализа активных областей и групп пятен 13664 и 13666 будем использовать оптические изображения солнечного диска, полученные прибором HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) на борту Обсерватории Солнечной Динамики SDO

(Solar Dynamics Observatory), базирующейся на геостационарной орбите (Joint Science Operations Center (JSOC) Data Products, stanford.edu). Также рассмотрим фотосферные карты магнитного поля (магнитограммы) по данным того же прибора. Информацию о вспышках берем по данным рентгеновских наблюдений спутника GOES, а характеристики групп пятен с портала solarmonitor.org и хранилища <ftp://ftp.swpc.noaa.gov>.

На примере группы 13666 без вспышечной активности мы видим биполярную структуру с четким большим головным пятном (в правой части изображения) и россыпью мелких хвостовых (в левой части изображений) пятен противоположной полярности. В случае богатой мощными вспышками активной области с номером 13664 мы имеем значительные изменения структуры магнитного поля и вида группы пятен на протяжении ее движения по диску Солнца.

Два рассмотренных примера четко показывают разницу между вспышечной и безвспышечной конфигурациями пятен и структурой магнитного поля. Для вспышечной конфигурации необходима большая сложность магнитного поля и группы пятен, запутанность нейтральной линии магнитного поля (линии, разделяющей полярности магнитного поля), быстрый видимый рост группы пятен. Именно в такой ситуации запутанного магнитного поля могут реализоваться условия для неустойчивостей плазмы, приводящие к эффективному магнитному пересоединению и солнечным вспышкам. Эти качественные интуитивные критерии можно выразить в количественной форме. Другими словами, можно придумать более формальные способы оценки вероятности появления мощных вспышек на основе оценки сложности группы пятен и роста размеров этой группы.

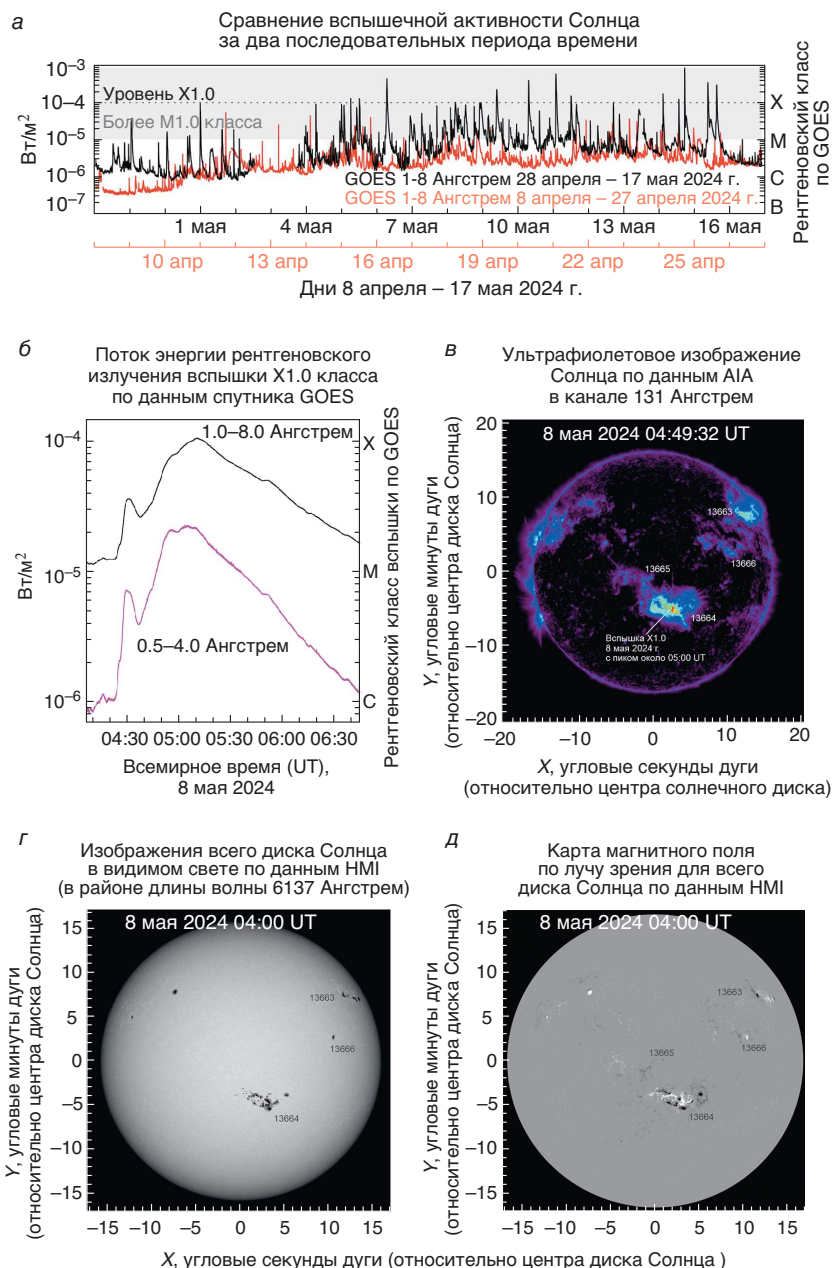


Рис. 2. Обзор солнечной вспышечной активности в период с 8 апреля по 17 мая 2024 г.: а – сравнение двух периодов времени с разной вспышечной активностью по данным наблюдений GOES: 8 апреля – 27 апреля (небольшое количество вспышек класса M) и 28 апреля – 17 мая (очень много мощных вспышек классов M и X). Первая солнечная вспышка класса X из группы пятен 13664: б – поток рентгеновского излучения, в – положение на диске Солнца в ультрафиолете, г – конфигурация пятен, д – конфигурация магнитных полей на солнечном диске по лучу зрения по данным HMI (чёрные и белые цвета соответствуют разным полярностям магнитного поля, внутрь и из Солнца соответственно)

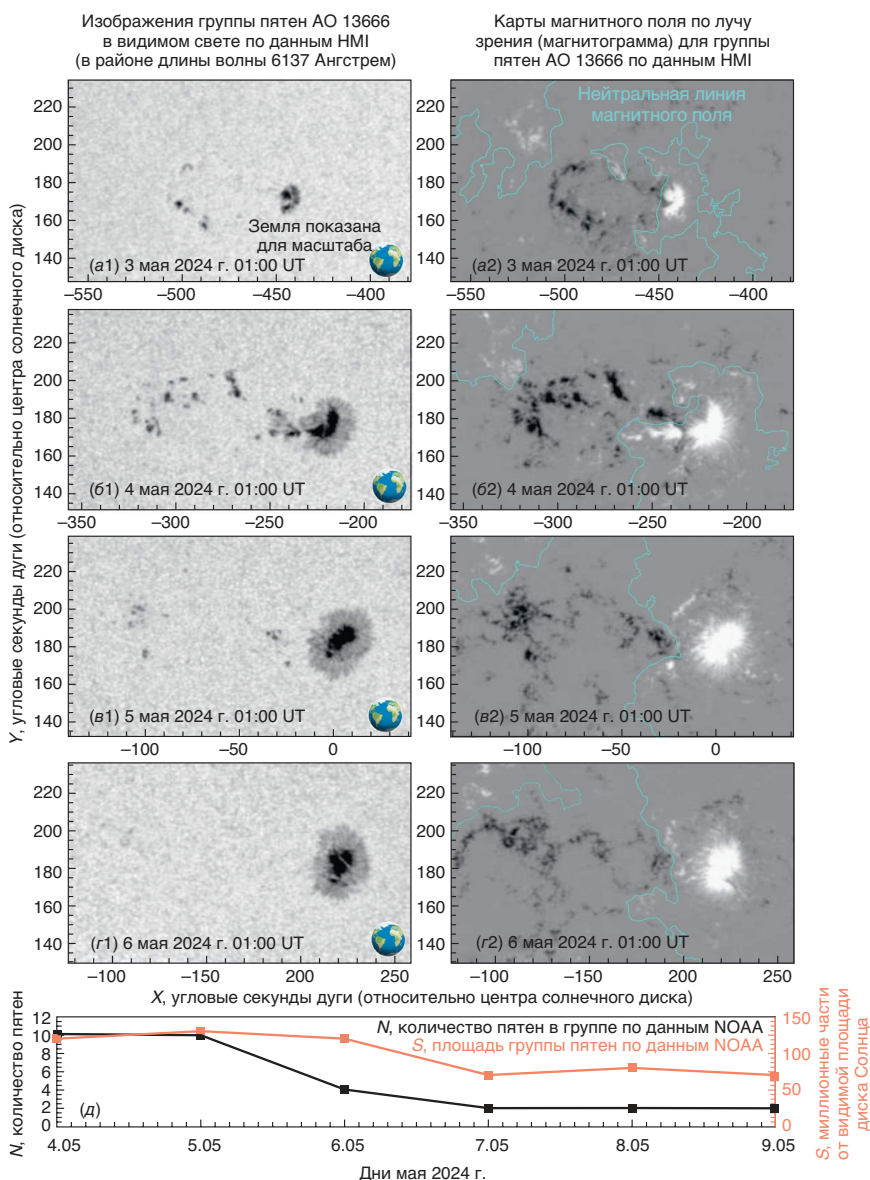


Рис. 3. Динамика группы пятен и распределения магнитного поля по лучу зрения на фотосфере по данным HMI для активной области 13666. Оптические изображения групп пятен (a1–z1); магнитограммы по лучу зрения, т.е. проекция вектора магнитного поля на луч зрения (a2–z2). В обоих случаях поле зрения одинаковое в секундах дуги. На магнитограммах указана линия раздела полярностей магнитного поля, т. е. нейтральная линия (циановый). Данная линия показывает границу, по разные стороны которой магнитное поле в пятнах выходит из Солнца (белый) либо входит в него (черный); имеет простую геометрию. С целью оценки масштаба приведено изображение Земли. Группа пятен рождается (а), увеличивается в размерах (б), часть пятен начинает пропадать (в–з). Динамика числа пятен (черный) и площади группы пятен (красный) по данным solarmonitor.org (д), на протяжении пяти дней группа уменьшается

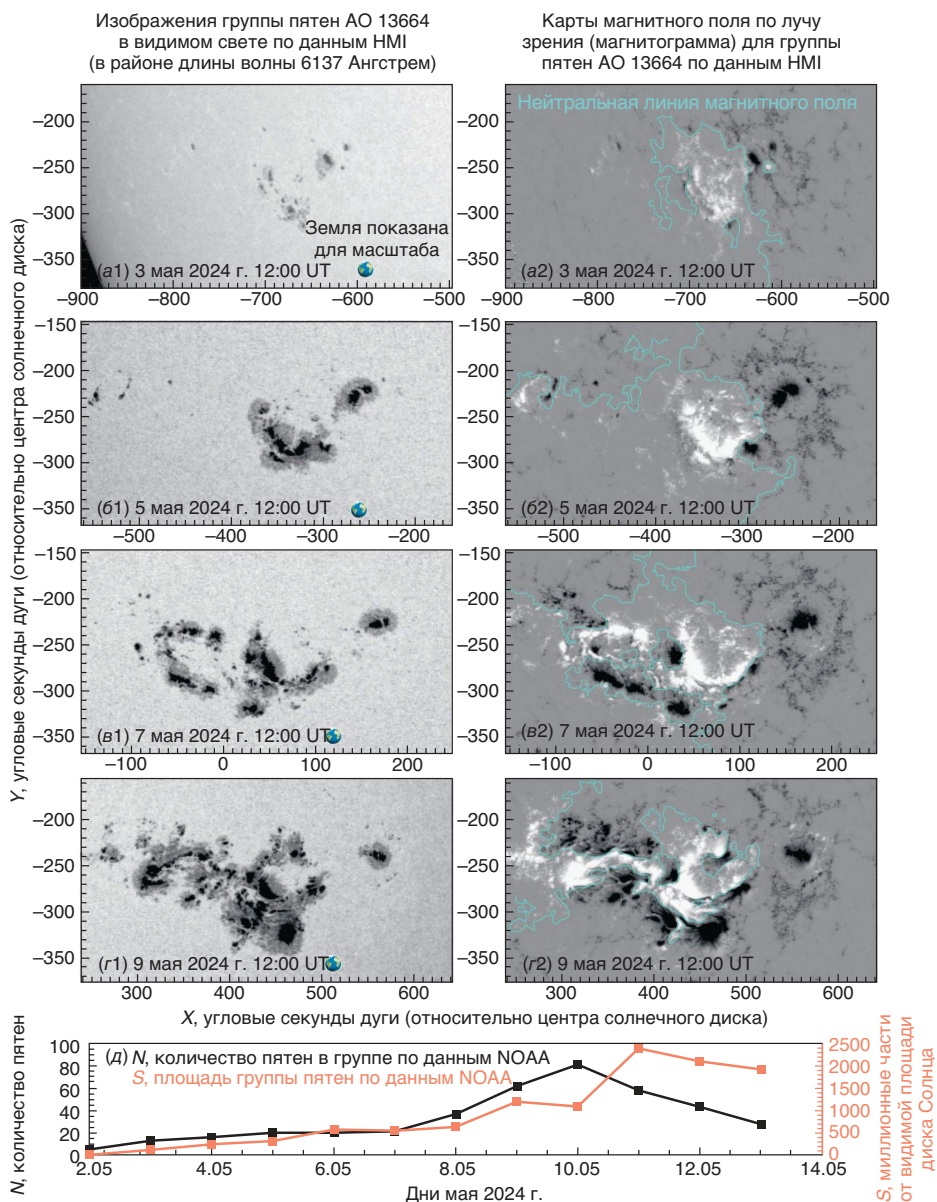


Рис. 4. Динамика группы пятен и распределения магнитного поля по лучу зрения на фотосфере по данным HMI для активной области 13664. Период времени 3–9 мая 2024 г. (а–г). Видно увеличение количества пятен, увеличение суммарной площади группы, значительное усложнение структуры за счет слияния многих пятен противоположной полярности. Нейтральная линия имеет сложную геометрию, возникает множество смен полярности (в–г). В случае биполярной геометрии перемежаемость полярностей минимальна (а–б). Динамика количества пятен (черный) и площади группы пятен (красный) четко показывает значительный стабильный рост, начиная с самого начала наблюдений, но наиболее интенсивный рост был в период 7–12 мая, когда наблюдались мощные вспышки класса X (д), по данным solarmonitor.org

МЕТОД ПРОГНОЗА ВСПЫШЕК, ОСНОВАННЫЙ НА КЛАССИФИКАЦИИ МАКИНТОША

Физики-солнечники, как и все исследователи природы, любят классифицировать изучаемые объекты. Американский солнечник Патрик Макинтош опубликовал в далеком 1990 г. статью, в которой предложил все группы солнечных пятен разделять на 60 классов. На самом деле, он модифицировал более раннюю классификацию групп пятен, разработанную в Цюрихской обсерватории.

Каждой группе пятен присваивается название из трех букв английского алфавита типа Zrc :

1. Параметр Z характеризует общий вид и долготный размах группы пятен (Z принимает значения A, B, C, D, E, F, H).

2. Параметр r (принимаяющий значения x, r, s, a, h, k) характеризует главное пятно в группе, его размер по широте (обычно это головное или лидирующее пятно, находящееся впереди остальных пятен группы по направлению вращения Солнца с востока на запад вокруг собственной оси).

3. Параметр c (принимаящий значения x, o, i, s) говорит о том, как устроена внутренняя часть группы пятен, как близко пятна прижаты друг к другу.

Такая классификация удобна для краткого описания групп солнечных пятен. Солнечникам не нужно каждый раз подробно описывать все пятна в группе, достаточно сказать, что группа пятен имеет класс Макинтоша, например, Axx или Fkc , и другим солнечникам будет примерно понятно, о чем идет речь.

Выяснилось, что есть связь между классами Макинтоша групп пятен и вспышечной активностью, которая происходит в группах. В среднем, чем больше долготный размер группы

пятен (параметр Z стремится от A к F), чем крупнее и сложнее главное пятно в группе (параметр r стремится от x к k) и чем более сложная внутренняя структура пятен, их перемешанность внутри группы (параметр c стремится от значения x к s), тем с большей вероятностью в группе могут происходить мощные вспышки. На основе выполненных за много лет наблюдений за Солнцем с Земли и с космических аппаратов серии GOES был накоплен и проанализирован большой объем информации и построена специальная таблица, в которой содержатся значения вероятностей, с которыми вспышки рентгеновских классов C , M и X могут происходить в группах пятен разных классов Макинтоша в течение 24 часов с момента наблюдения пятен. Эта таблица и позволяет делать краткосрочный (на 1 сутки вперед) прогноз вспышек.

Хотя выборка проанализированных событий большая (несколько тысяч различных групп пятен), ее пока недостаточно, чтобы делать количественный прогноз вспышек. Другими словами, этот подход не позволяет спрогнозировать точно, что в течение суток в конкретной группе пятен произойдет, например, три вспышки класса C , две вспышки класса M и одна вспышка класса X . Тем более нельзя сказать, какого именно подкласса окажется каждая из вспышек (например, $C8.9$, $C4.5$, $C2.6$, $M9.1$, $M3.7$ и $X5.4$). Все, что можно, по сути, сделать, это оценить вероятности того, что в группе произойдет по крайней мере одна вспышка класса C (например, с вероятностью 0.92), одна вспышка класса M (с вероятностью 0.79) и одна вспышка X (с вероятностью 0.27). Отметим, что самая высокая вероятность вспышки класса X в таблице имеет значение всего лишь 0.27 (в группе пятен самого верхнего класса Fkc – это самые крупные группы с огромным лидирующим пятном

и сложной внутренней структурой). Это говорит о том, что на основе классификации Макинтоша нельзя спрогнозировать самую мощную вспышку с точностью выше примерно 0.25. Грубо говоря, из четырех суток наблюдений за группой пятен класса Fkc можно ожидать в среднем лишь одну вспышку класса X. Подчеркнем, что это в среднем. Для конкретных групп пятен (см. табл. 1) реальная ситуация может отличаться, такова игра случая.

Очевидно, указанная выше точность довольно низкая, поэтому исследователи пытаются придумать другие классификации групп пятен, но пока получается не намного лучше, и рассматриваемый тип прогноза до сих пор актуален в практическом использовании. Его существенным преимуществом является использование наиболее простых наблюдательных данных в оптическом диапазоне, которые можно получать даже с помощью любительских телескопов.

Давайте применим классификацию Макинтоша для ретроспективного составления прогноза вспышек 1–14 мая 2024 г. Используя каталоги вспышек и групп пятен, доступные в Интернете, а также воспользовавшись таблицей вероятностей вспышек для разных классов Макинтоша (мы не приводим саму таблицу в нашей статье по причине ее громоздкости) построим таблицу только для четырех групп пятен, которым соответствуют активные области 13663, 13664, 13665 и 13666. В первых двух происходило много вспышек, в последних двух вспышек не было, они приведены просто для сравнения. В таблице указаны классы Макинтоша этих групп пятен для каждого суток с 1 по 14 мая, дано число наблюдавшихся за сутки вспышек классов C, M, X (отдельно) и дан прогноз, ожидается ли вспышка классов C, M, X в этой группе в данные сутки («Да» или «Нет»). Пустые ячейки означают, что в эти сутки

группа пятен не наблюдалась. Примем, что если вероятность вспышки данного класса (согласно статистическим таблицам) ниже 0.05, то прогноз дает «Нет», а если выше, то прогноз дает «Да». Этот порог, конечно, условный. В математической статистике в зависимости от задачи допустимо использовать пороги вплоть до 0.5, но очевидно, что чем ниже выставаемый порог, тем сильнее перестраховка при выдаче прогноза.

Ячейки таблицы покрашены в четыре цвета со следующими значениями.

1. Вспышка данного класса спрогнозирована и наблюдалась, обозначено «Да-Да» или «ДД» (*салатовый*).

2. Вспышка данного класса спрогнозирована, но не наблюдалась, обозначено «Да-Нет» или «ДН» (*желтый*).

3. Вспышка не спрогнозирована, но произошла, обозначено «Нет-Да», «НД» (*красный*).

4. Вспышка не спрогнозирована и не произошла, обозначено «Нет-Нет» или «НН» (*голубой*).

Понятно, что в случаях «Да-Да» и «Нет-Нет» прогноз дал корректный результат, а при «Да-Нет» и «Нет-Да» – некорректный. Салатовых и голубых ячеек в совокупности явно больше, чем желтых и красных. Это видно также из таблицы, где подсчитаны значения четырех разных случаев: $N_{ДД}$, $N_{ДН}$, $N_{НД}$, $N_{НН}$. Процент правильных прогнозов определяется простой формулой из теории вероятностей:

$$\text{ППП} = (N_{ДД} + N_{НН}) / (N_{ДД} + N_{ДН} + N_{НД} + N_{НН}) = 0.72,$$

что является неплохим результатом (явно больше, чем 0.5, если, к примеру, подбрасывать монетку). Так называемый коэффициент ложных срабатываний прогноза

$$\text{КЛС} = N_{ДН} / (N_{ДД} + N_{ДН}) = 0.39$$

показывает, как часто прогноз ошибочно говорит нам о том, что будет вспышка.

Таблица 1

**Информация о наблюдавшихся солнечных вспышках классов С, М, Х
в активных областях 13663–13666 в период с 1 по 14 мая 2024 г.
и прогноз вспышек в этих областях на основе известных вероятностей вспышек
для групп солнечных пятен разных классов Макинтоша**

Май 2024	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
Активная область 13663 (ДД: 18, ДН: 11, НД: 1, НН: 3)														
Класс (н – наблюдаемый, п – прогнозируемый)	<i>Bxo</i>	<i>Dso</i>	<i>Dac</i>	<i>Ekc</i>	<i>Ekc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>			
С (н)	5	4	5	13	7	6	0	0	0	0	0			
С (п)	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д			
М (н)	0	1	3	5	6	4	7	5	2	0	0			
М (п)	Н	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д			
Х (н)	0	0	1	0	2	1	0	1	0	0	0			
Х (п)	Н	Н	Н	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д			
Активная область 13664 (ДД: 27, ДН: 8, НД: 0, НН: 3)														
Класс (н – наблюдаемый, п – прогнозируемый)		<i>Dao</i>	<i>Dai</i>	<i>Eai</i>	<i>Ekc</i>	<i>Ekc</i>	<i>Ekc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>	<i>Fkc</i>
С (н)		6	3	1	3	2	1	2	0	3	2	4	6	1
С (п)		Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д
М (н)		1	1	0	3	0	4	6	6	10	5	7	6	0
М (п)		Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д
Х (н)		0	0	0	0	0	0	2	2	1	2	1	0	3
Х (п)		Н	Н	Н	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д
Активная область 13665 (ДД: 0, ДН: 2, НД: 0, НН: 10)														
Класс (н – наблюдаемый, п – прогнозируемый)			<i>Axx</i>	<i>Hrx</i>	<i>Hrx</i>	<i>Axx</i>								
С (н)			0	0	0	0								
С (п)			Н	Д	Д	Н								
М (н)			0	0	0	0								
М (п)			Н	Н	Н	Н								
Х (н)			0	0	0	0								
Х (п)			Н	Н	Н	Н								
Активная область 13666 (ДД: 0, ДН: 8, НД: 0, НН: 16)														
Класс (н – наблюдаемый, п – прогнозируемый)				<i>Cai</i>	<i>Cai</i>	<i>Cso</i>	<i>Cso</i>	<i>Hsx</i>	<i>Hsx</i>	<i>Hsx</i>	<i>Hsx</i>			
С (н)				0	0	0	0	0	0	0	0			
С (п)				Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д			
М (н)				0	0	0	0	0	0	0	0			
М (п)				Д	Д	Н	Н	Н	Н	Н	Н			
Х (н)				0	0	0	0	0	0	0	0			
Х (п)				Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н			

Таблица 2

Число четырех различных реализаций прогноза солнечных вспышек классов С–Х в активных областях 13663–13666 за период 1–14 мая 2024 г. на основе классификации Макинтоша

Вспышка спрогнозирована	Вспышка наблюдалась	
	Д	Н
Д	45	29
Н	1	32

С точки зрения практического интереса наиболее неприятным случаем является «Нет-Да», когда вспышка не прогнозируется, но все же происходит. Особенно в случае самых мощных вспышек класса Х. Можно вообразить следующую реальную ситуацию. К примеру, на завтрашний день запланирован выход космонавта в открытый космос для выполнения ремонтных работ космической станции. Прогноз ошибочно указывает, что мощной вспышки не будет, и центр управления полетами разрешает выход за пределы станции. Вспышка происходит, и космонавт получает большую дозу радиации. Однако этой ситуации все-таки можно избежать. Из таблицы видно, что за весь рассматриваемый интервал времени такой неприятный случай произошел только 1 раз 3 мая в активной области 13663 (красная ячейка). Поскольку для этой области (а также для области 13664) для этих суток были спрогнозированы вспышки классов С и М, то, скорее всего, ЦУП все же не разрешил бы космонавту выход в космос. Тем не менее приведенный пример очень наглядный. Он показывает, что прогноз, сделанный по этому методу, далеко не идеален. Таким образом, исследователям нельзя останавливаться и нужно стремиться улучшать качество прогноза. Кроме того, поскольку метод носит вероятностный характер, разумно использовать несколько независимых

вероятностных методов одновременно, а потом уже делать количественные выводы.

МЕТОД ПРОГНОЗА ВСПЫШЕК НА КРИТЕРИЯХ В.Н. ИШКОВА

Рассмотрим другой подход к прогнозу солнечных вспышек. В его основе лежат накопленные знания об эволюции активных областей и идея о том, что вспышки являются результатом выделения магнитной энергии в результате взаимодействия магнитных потоков: «старого», уже имеющегося в активной области, и «нового» потока, всплывающего из-под поверхности Солнца (в такой ситуации реализуется неустойчивость, приводящая к вспышке).

Напомним, магнитным потоком называют поток вектора напряженности магнитного поля **B** через некоторую поверхность. В нашем случае поверхность ограничена площадью активной области, и беззнаковый (без учета направления вектора поля) магнитный поток вычисляется как

$$F_B = \sum |\mathbf{B} \cdot \cos(\mathbf{B}, \mathbf{n})| \Delta s,$$

где суммирование проводится по всем ячейкам с площадью Δs внутри активной области на фотосфере, **n** – вектор нормали к поверхности в ячейке.

Для того чтобы в активной области произошли сильные вспышки, должны выполняться некоторые условия. Известный советский и российский солнечник Виталий Никитьевич Ишков сформулировал критерии, согласно которым для реализации сильных вспышек необходимо, чтобы новый магнитный поток в активной области превысил 10^{13} Вб (Вебер) и скорость его всплытия была не ниже 10^9 Вб/с. Тогда, по достижении этих значений в активной области начнут появляться сильные вспышки через время из интервала от 0.5 до 2 суток. Причем вспышки классов М и Х редко происходят в одиночку, обычно они происходят сериями, длительность которых составляет от 16 до 80 часов. Данный критерий следует из эмпирического опыта: сильные вспышки возникают в сложных быстро (скачкообразно) растущих группах пятен, достигающих больших размеров.

Подход Ишкова, как и рассмотренный выше подход Макинтоша, не позволяет спрогнозировать точные параметры отдельных вспышек в области. Другими словами, он не дает ответа на вопрос, сколько вспышек будет, когда они точно произойдут, с каким классом и др. Однако этот подход позволяет спрогнозировать, может ли в скором времени начаться повышенная вспышечная активность и сколько примерно она продлится.

Давайте проверим, насколько хорошо работают эти критерии на примере уже произошедших вспышек в начале мая 2024 г., в четырех рассмотренных активных областях 13663, 13664, 13665 и 13666. Для этого используем специально приготовленные карты магнитного поля на фотосфере в этих областях, полученные с помощью телескопа-магнитографа SDO/HMI, а также рентгеновские данные с космического аппарата GOES. С помощью этих карт вычислим

магнитные потоки $F_B(t)$ и скорости их изменения, т.е. производную по времени $dF_B(t)/dt$ для этих областей.

Результаты оказываются следующими. Для всех четырех областей характерен изначальный резкий рост магнитного потока в течение промежутка времени от 1 до 2 суток. На этом этапе активные области появлялись из-за восточного края солнечного диска и/или увеличивались в размерах, при этом в них не происходили вспышки классов С, М, Х. Беззнаковый магнитный поток всех четырех областей достиг примерно 10^{14} Вб, но для областей 13663 и 13664 поток продолжил увеличиваться, а для 13665 и 13666 он начал уменьшаться. Скорость этого дополнительного увеличения (всплытия) магнитного потока в области 13663 превышала 10^9 Вб/с в период с 1 по 4 мая, для области 13664 этот порог был превышен в интервале примерно с 5 по 10 мая. Для областей 13665 и 13666 этот порог скорости изменения магнитного потока практически не был превышен или был превышен на коротком интервале времени, длительностью всего около 1 суток.

Из результатов следует, что серии мощных вспышек классов М и Х действительно происходили в эти интервалы времени в областях 13663 и 13664, но не в 13665, для которой время превышения второго критерия было коротким.

Таким образом, критерии Ишкова сработали для трех из четырех областей. А при введении дополнительных критериев (в частности, на время длительности роста магнитного потока) критерии сработали для всех рассмотренных областей. Можно сделать вывод, что это подход вполне эффективен для прогнозирования серий сильных вспышек, в особенности в наиболее многосоставных и крупных активных областях.

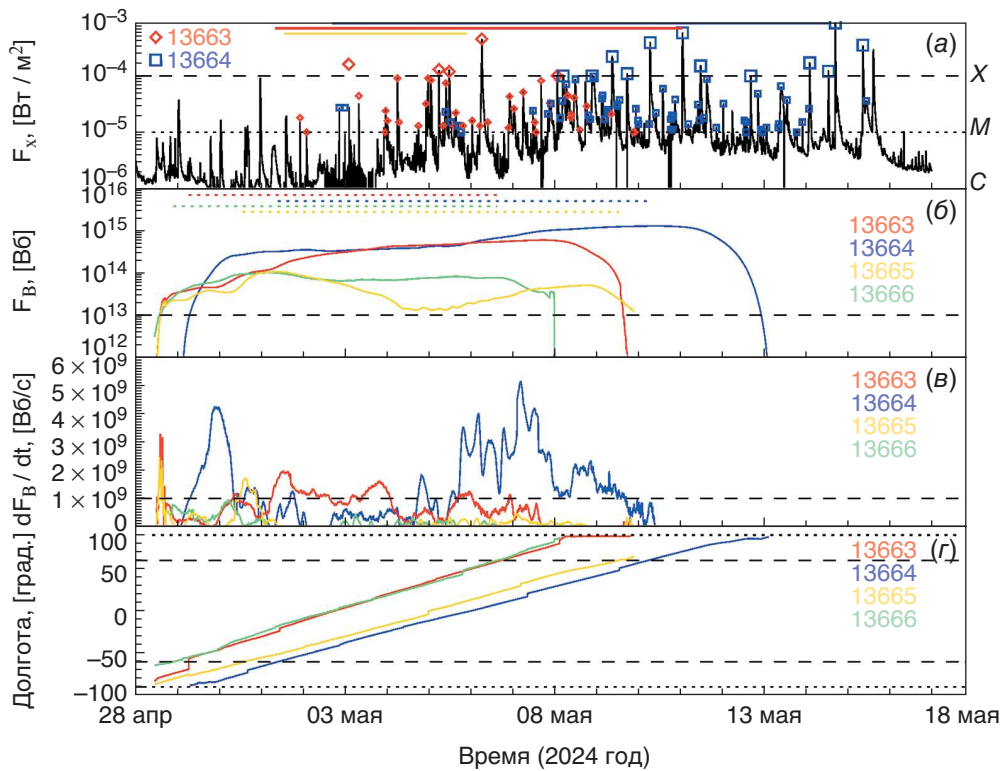


Рис. 5. Потоки рентгеновского излучения Солнца со вспышками (а), беззнаковые магнитные потоки (б), скорости их изменения и гелиографические долготы центров активных областей 13663 (красный), 13664 (синий), 13665 (желтый) и 13666 (салатовый) в интервале времени с 28 апреля по 18 мая 2024 г. Интервалы времени, когда серии мощных вспышек прогнозировались в областях с помощью критериев Ишкова, показаны горизонтальными жирными линиями сверху соответствующим цветом (а). Серии мощных вспышек классов М и Х действительно происходили в эти интервалы времени в областях 13663 (красные ромбы) и 13664 (синие квадраты), но не в 13665, для которой время превышения второго критерия было коротким

Отметим и основные недостатки подхода Ишкова. Во-первых, как было уже сказано, он не позволяет делать количественные прогнозы для отдельных вспышечных событий. Во-вторых, для реализации этого подхода требуется построение высокодетальных карт магнитного поля (магнитограмм) на фотосфере, что является существенно более сложной научно-технической задачей по сравнению с получением снимков солнечных пятен, необходимых для реализа-

ции подхода с классами Макинтоша. Более того, из-за сферичности Солнца надежное определение магнитного поля и магнитного потока вблизи краев солнечного диска практически невозможно с Земли. Это можно видеть по резкому завалу, когда центральная долгота активных областей достигает значения от 60° до 80° . В таких случаях с помощью подхода Ишкова очень проблематично прогнозировать вспышки и лучше использовать подход Макинтоша.

ПРОГНОЗ ВСПЫШЕК НА МАСТЕРСТВЕ И ОПЫТЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Обсудив выше методы Макинтоша и Ишкова, теперь обратим внимание читателя на тот факт, что все качественные и численные критерии прогноза вспышек на заре изучения физики солнечной активности реализовывались в виде интуиции астрономов-наблюдателей. Часто данные особенности было невозможно рационально объяснить. Более того, интуитивный прогноз делался не на основе общей формы группы пятен, а на выявлении особенностей формы и движения отдельных пятен и их взаимодействия с другими пятнами в окружении. Также учитывались данные наблюдений в других диапазонах электромагнитного спектра. Существуют даже некоторые «легенды» об отдельных практиках-наблюдателях, способных делать прогноз вспышек с точностью до часа. Сейчас мы уже не знаем, правда это или вымысел, но контекст данной истории поучителен и активно используется современной наукой, о чем мы вкратце расскажем ниже.

Ранее мы уже указали некоторые особенности групп пятен, наиболее эффективно проявляющих себя в солнечных вспышках. Данные особенности касались общей структуры и динамики группы пятен, но мы отвлекались от деталей внутренней структуры. В действительности, если посмотреть на отдельные пятна групп 13664 и 13666, то можно увидеть значительную разницу в их сложности при рассмотрении увеличенных фрагментов этих двух групп. Так, если для 13666 пятно имеет почти правильную эллиптическую форму, и оно четко структурировано на тень и полутень (т. е. присутствует темное ядро и более светлая оболочка вокруг),

то для 13664 имеется хаотическое нагромождение пятен и несколько нейтральных линий магнитного поля. Отдельные пятна погружены в единую полутень. Также заметим, что полутень структурирована на волоконца. В случае 13666 волоконца имеют аксиальную симметрию, тогда как в случае группы 13664 они имеют в некоторых местах спиралевидную закрутку. Можно дальше перечислять особенности группы 13664 в сравнении с 13666, но мы остановимся и зафиксируем, что все указанные особенности указывают на сложность группы пятен в локальном смысле (т. е. в окрестности отдельных пятен). На текущем этапе исследований известно, что вспышки часто начинают развиваться из локальных областей внутри групп пятен. Однако до сих пор практически не существует формальных критериев прогноза вспышек на основе локальных особенностей распределения пятен и сопряженных с ними магнитных полей. Такие прогнозы пока представляют «научное искусство», выдаваемое экспертами-солнечниками, но не реализованы в виде прямых программных средств.

Прогресс не стоит на месте. Современная наука о Солнце, пока неспособная установить новые четкие критерии прогноза вспышек на основе локальных методов, пытается реализовать интуицию астрономов-наблюдателей путем применения продвинутых алгоритмов машинного обучения (в том числе нейронных сетей). В этом случае алгоритмы, будучи «черными ящиками», выдают некоторые прогнозы (далеко не лучше старых проверенных прогнозов), притом без понимания физики процесса. В итоге, даже используя современные достижения математики и компьютерных технологий, мы все равно пока остаемся без четкого физически оправданного критерия прогноза вспышек на основе локальных свойств

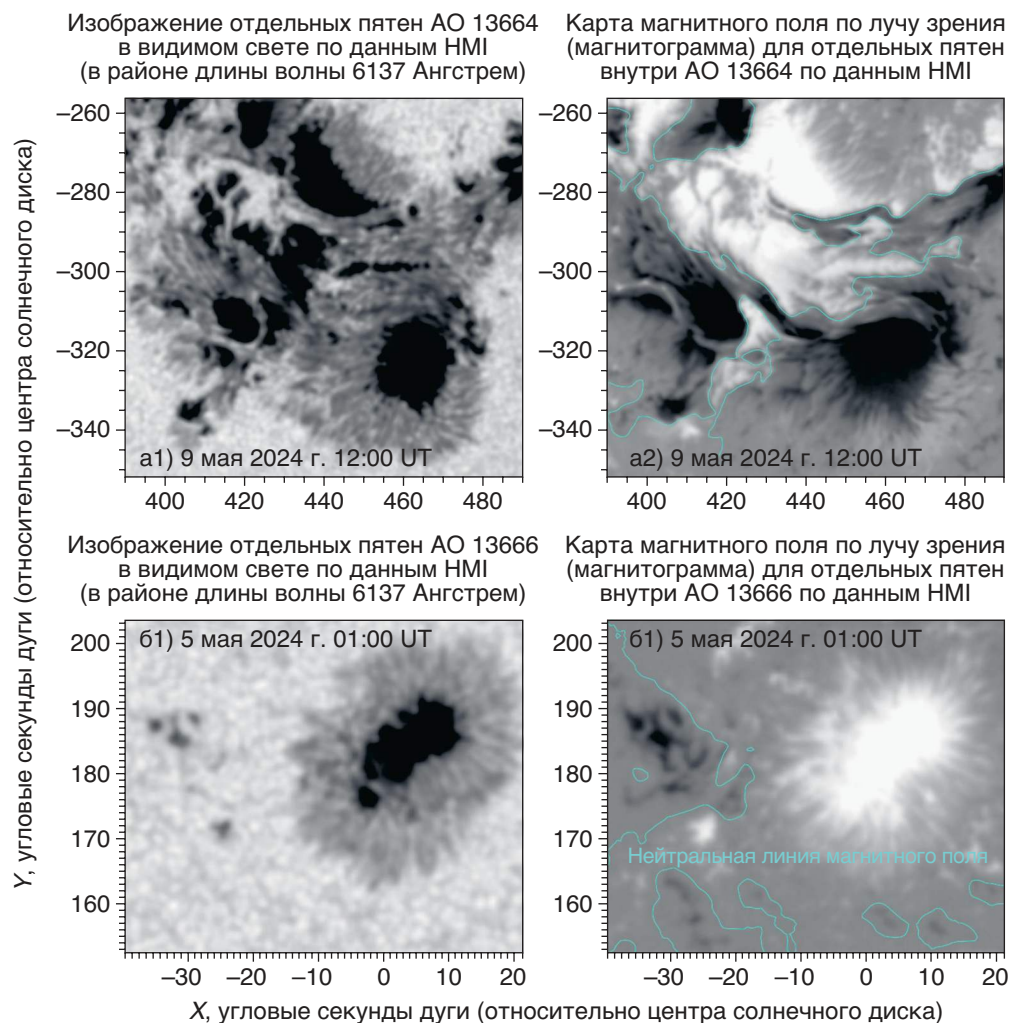


Рис. 6. Сравнение увеличенных областей групп пятен 13664 и 13666. Слева показаны оптические изображения с пятнами, а справа демонстрируются магнитограммы по лучу зрения по данным HMI

групп пятен. Конечно, данное замечание не имеет цели принизить достоинства машинных методов, а лишь указывает на необходимость объединения усилий в исследованиях солнечной активности и методов ее прогнозирования. Другими словами, необходимо развитие комплексных программ исследований эволюции групп пятен и солнечных вспышек с гармоничным

вовлечением новых математических методов, современной физики и бесценного опыта астрономов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Помимо того, что физика Солнца в современной науке является одним из разделов области фундаментальных

исследований звезд – астрофизики, на нее также возлагается решение серьезной задачи прикладного характера, а именно: построение прогнозов космической погоды для обеспечения качественной бесперебойной деятельности космической и некоторой наземной инфраструктуры. В этой статье мы продемонстрировали некоторые подходы прогнозирования солнечных вспышек на примере серии майских событий 2024 г., которые уникальны с точки зрения их количества и зарегистрированных геомагнитных эффектов. Было показано, что использованные «классические» подходы весьма эффективны с точки зрения прогноза серий вспышек на масштабах суток. И в целом они неплохо справились с прогнозом майской серии вспышек. Однако мы также обсудили, что на сегодняшний день не существует количественных прогнозов, позволяющих точно определять время наступления и характеристики отдельных вспышек. Вероятно, новые математические подходы к машинному обучению в применении к «большим» (исчисляемым тысячами ТБ) данным комплексных наблюдений Солнца в разных диапазонах электромагнитного спектра позволят существенно продвинуться в решении этой задачи. Это будет возможно при разработке физически обоснованных критериев, чувствительных к переходу группы пятен в неустойчивое положение

с точки зрения грядущих солнечных вспышек. Пока действующих алгоритмов такого плана не существует. Еще сложнее задача прогнозирования эффектов космической погоды от солнечных вспышек: определение потоков ионизирующего излучения, радиационной обстановки и особенностей корональных выбросов массы. Их прогноз сейчас осуществляется по большей мере на основе мониторинга околосолнечного и межпланетного пространства, а не наблюдений непосредственно за вспышками. Но это уже совсем другая история, выходящая за рамки нашей статьи.

Литература

1. Илларионов Е.А., Садыков В.М. Как машинное обучение помогает изучать Солнце // Земля и Вселенная. 2021. № 4. С. 35–45.
2. Леденцов Л.С., Сомов Б.В. Магнитное пересоединение и День взятия Бастилии // Земля и Вселенная. 2021. № 4. С. 8–23.
3. Богачев С.А., Ульянов А.С., Кириченко А.С., Лобода И.П., Рева А.А. Солнце под микроскопом – природа вспышек. Микро- и нановспышки // Земля и Вселенная. 2021. № 4. С. 24–34.
4. Накаряков В.М., Зимовец И.В., Анфиногентов С.А. Плазменная симфония, или магнитогидродинамические волны в короне Солнца // Земля и Вселенная. 2022. № 5. С. 5–21.
5. Кацова М.М., Соколов Д.Д. Солнечная и звездная активность в ожидании сюрпризов // Земля и Вселенная. 2021. № 3. С. 39–51.



**ПОКУПАЙТЕ ДЕШЕВЛЕ
В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»**

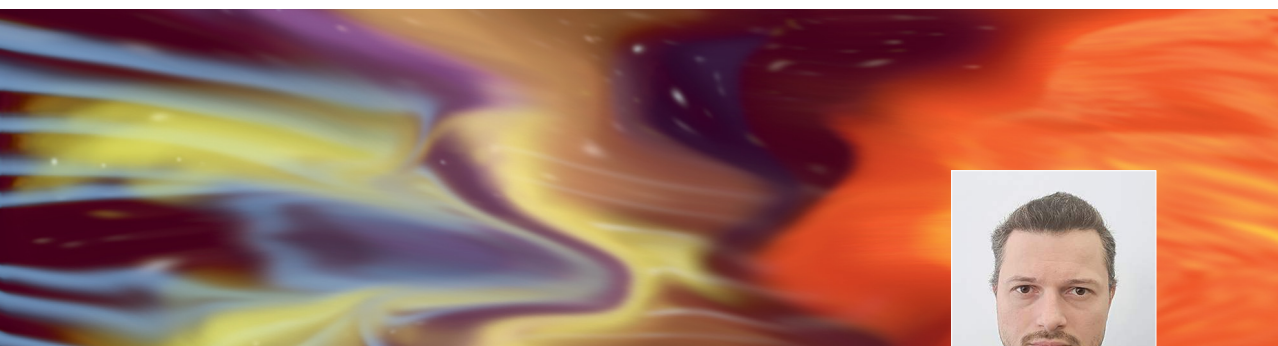


КНИГИ



ЖУРНАЛЫ

ОБЗОР СООБЩЕНИЙ О ПОСЛЕДСТВИЯХ СОЛНЕЧНЫХ И ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ В МАЕ 2024 ГОДА



КИРИЧЕНКО Алексей Сергеевич,

кандидат физико-математических наук
Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/50044394824060033

Поступила в редакцию: 23.09.2024
Принята к публикации: 23.09.2024

В мае 2024 года на фоне высокого уровня солнечной активности произошла самая сильная магнитная буря за последние 20 лет. Последнее событие такого масштаба было зафиксировано осенью 2003 года.

Основной интерес представляет масштаб последствий, который имела майская буря для нашей планеты. Само событие вызвало существенный интерес и широко освещалось и обсуждалось в СМИ. Одним из способов понять, какие области деятельности человека были в той или иной мере затронуты может быть обзор сообщений, связанных с бурей, как в научных изданиях, так и СМИ. Но перед тем как делать такой обзор, уместно напомнить читателю о том, что же такое магнитные бури, какие они несут риски и чем так примечательно событие, о котором пойдет речь.

ПОЧЕМУ ВОЗНИКАЮТ МАГНИТНЫЕ БУРИ

Словосочетания «солнечная погода» и «магнитные бури» все более прочно входят в нашу повседневную жизнь и все чаще встречаются в СМИ. Такая тенденция вполне объяснима, учитывая растущую зависимость человечества от высокочувствительного телекоммуникационного спутникового оборудования. Ведь именно подобные системы наиболее чувствительны к геомагнитным возмущениям и ионизирующему излучению Солнца.

Наша планета обладает собственным магнитным полем, которое хорошо описывается как классический диполь. Однако из-за воздействия солнечного ветра его форма существенно искажена. Так, сильно отличаются

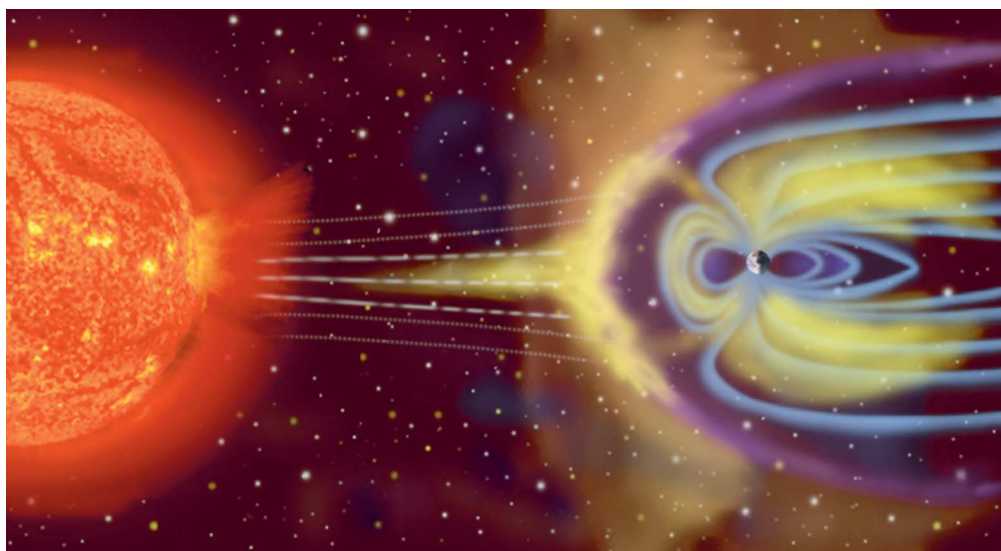


Рис. 1. Художественное изображение взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли

«дневная» и «ночная» стороны магнитного поля Земли. Если посмотреть на классическую картинку, которую обычно используют для иллюстрации солнечно-земных связей (рис. 1), можно увидеть, что часть магнитосферы Земли, обращенная к Солнцу, немного сжата, в то время как обратная сторона представляет собой вытянутую структуру с открытыми магнитными линиями. Таким образом, именно солнечный ветер считается ключевым фактором, определяющим состояние земной магнитосферы. Состав и характеристики солнечного ветра могут существенно меняться в зависимости от структур в солнечной атмосфере, находящихся вблизи центрального меридиана Солнца. Корональные дыры, активные области, вспышки и корональные выбросы массы (КВМ) – это основные источники заметных изменений параметров солнечного ветра.

Главным фактором, вызывающим магнитные бури, является солнечная активность – вспышки и сопутствующие

им явления. Солнечные фотоны достигают Земли примерно за 8 минут. С запазданием приходят заряженные частицы – наиболее высокоэнергичным из них требуется около 1 часа и более. В первую очередь они представляют угрозу для спутниковых систем и космонавтов на борту обитаемых станций (особенно во время внекорабельной деятельности). Время движения межпланетных корональных выбросов массы до Земли может составлять от суток до нескольких дней. При условии противоположной направленности магнитного поля КВМ и магнитного поля Земли КВМ может вызывать геомагнитные бури и суббури. Суть процесса заключается в том, что происходит магнитное пересоединение линий межпланетного поля и поля Земли. В результате происходит проникновение дополнительных заряженных частиц в магнитосферу – происходит накачка и ускорение частиц в зоне кольцевого тока (3–5 радиусов Земли). Возникающее в результате магнитное поле

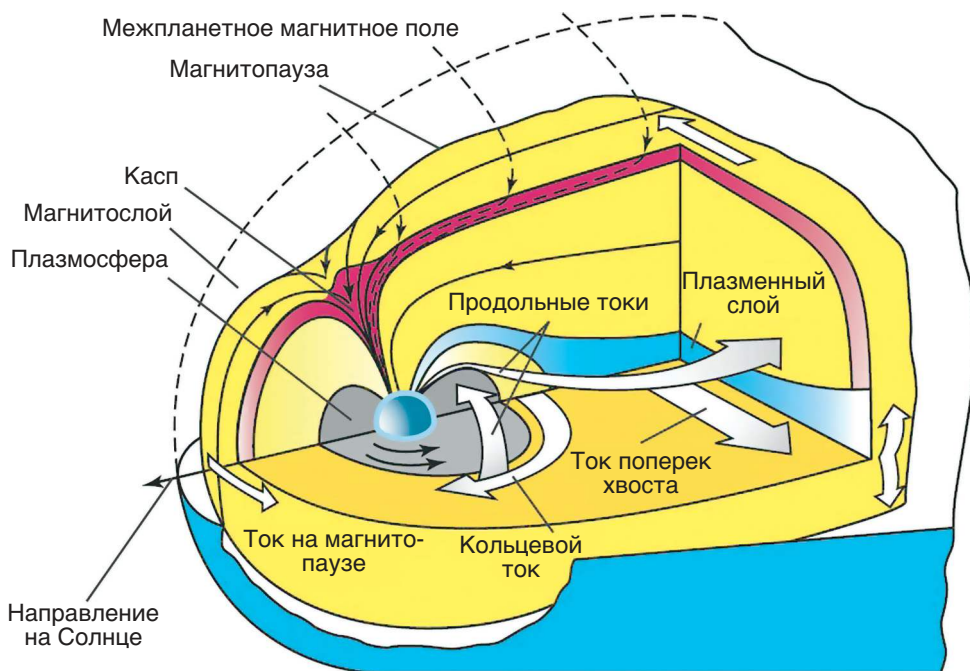


Рис. 2. Строение магнитосферы Земли

направлено противоположно «спокойному» полю Земли – в результате происходит ослабление геомагнитного поля в горизонтальном направлении. В дальнейшем происходит восстановление поля при последующем ослаблении кольцевого тока (в основном за счет кулоновского взаимодействия) – магнитосфера постепенно приходит в спокойное состояние.

ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Магнитные бури могут оказывать комплексное воздействие на целый ряд отраслей деятельности человечества: от навигации и телекоммуникаций до здравоохранения. Однако количественная оценка степени влияния магнитных бурь в некоторых областях представляет большие трудности. Это

связано как с отсутствием в свободном доступе необходимой информации, так и трудностей в их интерпретации. Так, например, для понимания степени влияния геомагнитных возмущений на здоровье человека необходимо проведение анализа большой статистической выборки для определения корреляции между состоянием магнитосферы и изменениями самочувствия людей. При этом в самой выборке будет присутствовать сразу целый ряд факторов, существенно ее искажающих. Например, погодные условия являются значительно более очевидным фактором, влияющим на состояние организма человека. Кроме того, каждая сильная магнитная буря широко обсуждается в СМИ, и, к сожалению, нередко ситуация существенно драматизируется, что может вызывать своего рода эффект плацебо, носящий сугубо психологический характер.

Куда более объективной может быть оценка влияния бурь на работу спутниковых систем и в том числе систем навигации. Сегодня магнитное поле Земли очень активно используется при определении ориентации аппаратов. В наноспутниках, характерный размер которых составляет десятки сантиметров, нередко магнитное поле используется как активное средство наведения. В состав аппаратуры в таком случае входят электромагниты, меняя ток в которых, можно корректировать ориентацию аппарата относительно магнитных силовых линий нашей планеты. Очевидно, что при значительных возмущениях могут возникать сбои в работе подобных систем.

В случае так называемых супербурь (наиболее сильных возмущений) может происходить даже сдвиг траекторий движения низкоорбитальных спутников за счет нагрева атмосферы в авроральных областях. А это уже чревато очень опасными последствиями – вплоть до потери спутника из-за схода с орбиты и последующего вхождения в атмосферу.

РЕЙТИНГ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Нельзя сказать, что магнитные бури во время максимума солнечной активности редкое явление. Однако буря, наблюдавшаяся с 10 по 12 мая 2024 года стоит особняком из-за своей интенсивности. Для оценки силы магнитных бурь используется целый ряд определенных индексов: DST, Kp, SYM-H и ряд других. Так, например, Dst-индекс выражается в нТл и базируется на значении горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, измеренной в четырех околоэкваториальных геомагнитных обсерваториях. Суть его сводится к оценке интенсивности кольцевого тока по снижению горизонтальной

составляющей магнитного поля. Так, для невозмущенной магнитосферы значение Dst колеблется обычно в диапазоне ± 20 нТл. Экстремальными считаются уровни 200–250 нТл и выше. События, во время которых индекс составляет 500 нТл и более, принято относить к супербурям. За все время космической эры (с 1958 года) было зафиксировано только одно такое событие (см. таблицу). Оно наблюдалось 13–14 марта 1989 года (Dst = –589 нТл). Считается, что именно оно было причиной серьезного сбоя в системе энергообеспечения Квебека. В результате аварии произошло 9-часовое отключение света, что, безусловно, критично для жизни целого города. До 2024 года последняя буря экстремального уровня (Dst = –422 нТл) была зарегистрирована осенью 2003 года. Индекс Dst для майской бури составил –412 нТл. В рейтинге самых значительных геомагнитных возмущений, зафиксированных за время космической эры, данное событие стало 6 м по своей силе. Поэтому неудивителен возникший в СМИ резонанс.

Список самых интенсивных (по уровню индекса Dst) магнитных бурь начиная с 1958 года

[<https://www.spaceweatherlive.com/en/auroral-activity/top-50-geomagnetic-storms.html>]

Дата	Dst-индекс, нТл
14.03.1989	–589
15.07.1959	–429
13.09.1957	–427
11.02.1958	–426
20.11.2003	–422
11.05.2024	–412

КРАТКИЙ ОБЗОР СООБЩЕНИЙ О ПОСЛЕДСТВИЯХ БУРИ ПО ДАННЫМ СМИ

Буря негативно отразилась на возможностях передачи радиосигнала, в особенности в высокочастотном диапазоне. По сообщениям радиолюбителей в определенные моменты протекания бури практически невозможно было принять сигнал в диапазоне 2.3–17.9 МГц [<https://www.radioworld.com/tech-and-gear/tech-tips/what-i-heard-during-the-solar-event>]. Это объясняется изменениями плотности D-слоя ионосферы, что, в свою очередь, приводит к поглощению радиоизлучения и невозможности его распространения.

Илон Маск сообщил о заметном воздействии на группировку спутников Starlink. Однако существенных сбоев удалось избежать. Стабильность группировки в таких случаях, в том числе, обеспечивается за счет возможности автоматической корректировки высоты летной орбиты [<https://www.reuters.com/technology/space/starlink-experiencing-degraded-service-musk-says-satellites-under-pressure-2024-05-11/>].

О сбоях в электросетях, снижении качества работы GPS и высокочастотной радиосвязи сообщило также Национальное управление океанических и атмосферных исследований (США) [<https://www.swpc.noaa.gov/news/g5-conditions-reached-yet-again>].

Сбои в работе GPS привели также к задержкам при выполнении сельскохозяйственных работ. Сообщается [<https://www.theverge.com/2024/5/12/24154779/solar-storms-farmer-gps-john-deer>] о прекращении посадок урожая в ряде регионов США из-за сильных магнитных бурь, вызвавших некорректное функционирование самоуправляемых

тракторов. Фермеры при использовании таких систем опираются на очень высокую точность для максимальной эффективности использования сельскохозяйственных угодий. По этой причине любые неполадки систем GPS критичны для проведения таких операций.

В Канаде энергетические компании BC Hydro и Hydro-Québec заявили, что они подготовились к предстоящей буре и предприняли необходимые меры. В отличие от 1989 года, когда самая мощная магнитная буря за последние десятилетия вызвала девятичасовое отключение электроэнергии в Квебеке, никаких серьезных аварий в этот раз не было зафиксировано [<https://vancouver.sun.com/news/local-news/bc-hydro-monitoring-geomagnetic-storm>][<https://montrealgazette.com/news/local-news/solar-storm-spares-province-of-any-power-outages-hydro-quebec-says>].

Учитывая негативный опыт Квебека в 1989 году, компания Transpower (Новая Зеландия) объявила о принятии чрезвычайных мер и вывела из эксплуатации некоторые линии сети электропередачи [<https://www.1news.co.nz/2024/05/12/solar-storm-transpower-extends-grid-emergency-declaration/>].

В Соединенных Штатах телекоммуникационные компании AT&T и T-Mobile заявили о готовности реагировать на сбои в своих сетях, однако было отмечено, что существенные последствия для сотовой связи маловероятны, поскольку используются частоты, отличные от ВЧ-диапазонов, связь которых во время геомагнитных возмущений наиболее уязвима [https://edition.cnn.com/weather/live-news/geomagnetic-solar-storm-northern-lights-05-10-24#h_d9cee670714177cdd710f5a32e81a016].

Буря вызвала сбои в работе электрических систем космического корабля Gaia EKA. Команда эксперимента пола-

гает, что этот факт в сочетании с недавним попаданием в спутник микрометеорита может существенно ухудшить перспективы дальнейшего продолжения экспериментов на борту аппарата [https://www.universetoday.com/167810/gaia-hit-by-a-micrometeoroid-and-caught-in-a-solar-storm/].

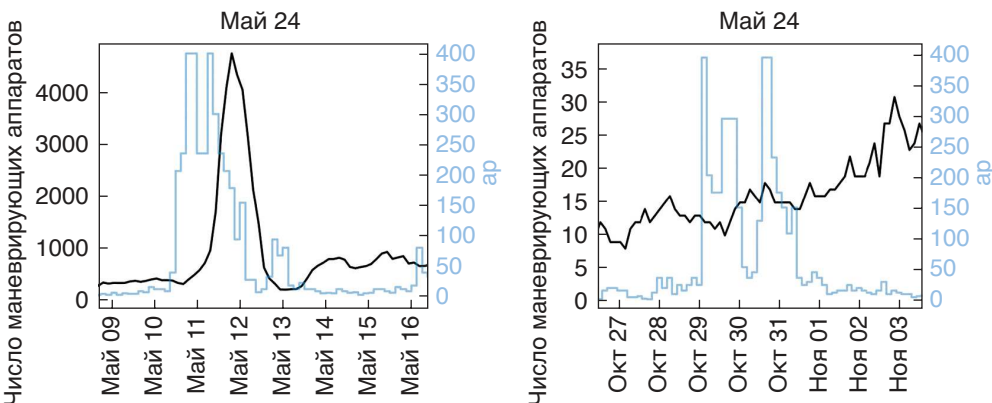
ВЛИЯНИЕ БУРИ НА ОРБИТУ СПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК

Отдельно стоит рассмотреть сообщение в журнале *Journal of Spacecraft and Rockets* [https://doi.org/10.2514/1.A36164], посвященное изменению характера движения низкоорбитальных спутников во время майской магнитной бури. Сам механизм такого влияния обусловлен изменениями плотности термосферы, которая простирается от высот порядка 80–90 км и до нескольких сотен километров. Именно на таких высотах размещаются наиболее используемые в космонавтике низкоорбитальные спутники. Например, малые спутники группировки Starlink имеют высоту полета около 500 км.

Во время сильных бурь плотность атмосферы на определенных высотах может вырастать на порядок. Это происходит в первую очередь за счет нагрева, обеспечиваемого инжектируемыми заряженными частицами в область термосферы во время бури.

В работе маневром считалось любое изменение высоты на уровень 100 метров и более в течение 3-часового промежутка времени. Было установлено, что в мае 2024 года в отсутствие каких-либо геомагнитных возмущений их число не превышало около 300 из 10 000, в то время как в течение развития самой бури маневр совершили уже более 4000 аппаратов. Это связано со снижением спутников из-за изменений параметров термосферы. Интересно, что в 2003 году картина выглядела несколько иначе. Виден тренд роста числа маневрирующих спутников, однако он носит не такой массовый характер и не столь синхронизован (см. рис. 3). Это можно объяснить в том числе тем, что сегодня существуют крупные спутниковые группировки со схожими алгоритмами автоматической корректировки высоты.

Рис. 3. Сравнение динамики маневров космических аппаратов во время майской бури и бури в октябре – ноябре 2003 года. Черным цветом показано число маневрирующих аппаратов, синим – индекс Ар, характеризующий уровень геомагнитных возмущений



«ПОЛЬЗА» МАГНИТНЫХ БУРЬ

Мощные магнитные бури и высокий уровень солнечной активности могут приводить не только к негативным последствиям для человечества, но оказывать своего рода услугу космонавтике в целом за счет очистки низких орбит от мусора. Благодаря «распуханию» атмосферы происходит заметное ускорение схода космического мусора со своей орбиты. На рис. 4 показано

вывода. С одной стороны, магнитная буря 10–12 мая не привела к какому-либо катастрофическим последствиям. Все возникшие неполадки скорее носили локальный характер и были в той или иной степени устранены, хотя все же стоит отметить, что в некоторых сферах деятельности человека они явно принесли определенные финансовые убытки. С другой стороны, важно понимать, что отсутствие серьезных аварий это скорее удачное сочетание целого ряда факторов,

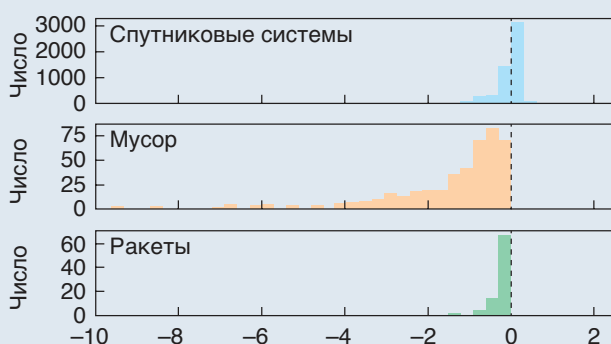


Рис. 4. Изменение высоты орбиты различных типов космических объектов во время майской бури

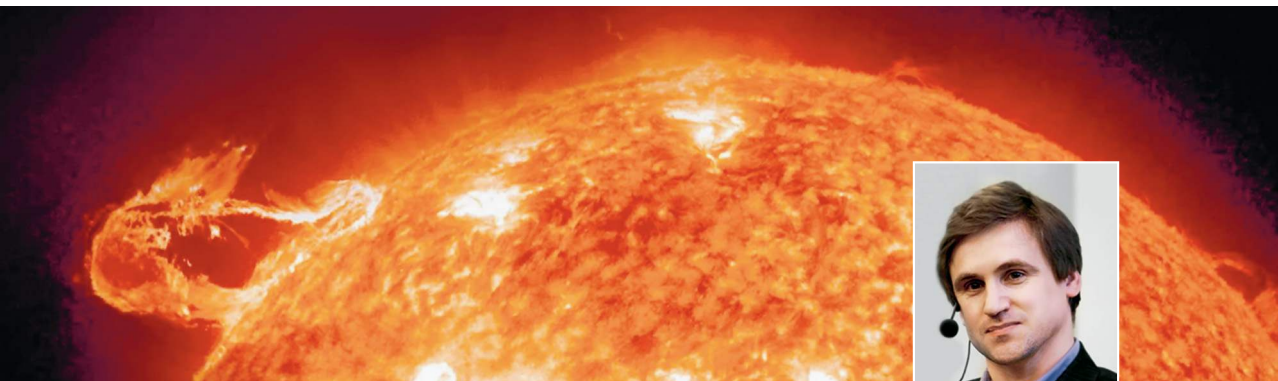
сравнение изменения высоты управляемых спутниковых систем, космического мусора и ракетных объектов во время майской бури (изменение за промежуток между 10 и 13 мая 2024 года). За счет маневрирования спутниковые системы способны компенсировать данный эффект, в то время как высоты орбит наблюдаемого космического мусора значительно снизились. Этот фактор будет приводить к более быстрому сторанию его в верхних слоях атмосферы. Учитывая проблему стремительного роста количества космического мусора на орбите, данное обстоятельство не может не вызывать интерес.

ВЫВОДЫ

Резюмируя приведенные выше сообщения, можно сделать два основных

связанных как с особенностями структуры магнитного поля КВМ, вызвавшего бурю, так и с режимами работы критической инфраструктуры, работавшей в этот момент. Также, необходимо отметить, что в таблице приведены только магнитные бури, произошедшие уже в так называемую «космическую эру» с 1958 года, которая насчитывает немногим более 60 лет. Есть свидетельства о существенно более мощных бурях, которые происходили ранее. И последствия таких бурь, с учетом растущей зависимости человечества от высокотехнологичной техники, могут быть катастрофическими. По этой причине необходимо активно развивать направления науки, связанные с изучением солнечно-земных связей и прогнозированием геоэффективных событий.

БЫВАЮТ ЛИ НА СОЛНЦЕ СУПЕРВСПЫШКИ?



БОГАЧЁВ Сергей Александрович,

*доктор физико-математических наук
Институт космических исследований РАН*

DOI: 10.7868/50044394824060045

Поступила в редакцию: 11.09.2024
Принята к публикации: 11.09.2024

В мае 2024 г. произошла наиболее крупная на данный момент солнечная вспышка в 25-м солнечном цикле. Событие имело уровень X8.7 (далее мы объясним для читателей, что значат эти цифры) и произошло 14 мая в той же активной области № 3664, которая произвела почти все активные солнечные события, которым в значительной степени посвящен данный выпуск. При этом в момент максимума вспышки в 20 ч 38 мин по московскому времени активная область уже настолько сильно сместилась на запад, что, по сути, находилась на обратной стороне Солнца. По этой причине вспышка не имела геомагнитных последствий и не привлекла такого внимания прессы и ученых, как менее крупные события несколькими днями ранее. Тем не менее, как уже говорилось, согласно каталогам, данное событие на тот момент было крупнейшим за весь

25-й цикл. Это дает повод обсудить, насколько крупной данная вспышка является в историческом ряде наблюдений, а также то, насколько крупными бывают или могут быть теоретически вспышки на Солнце.

КАК ИЗМЕРИТЬ СИЛУ ВСПЫШКИ

Давайте начнем с того, что обсудим, а как вообще измерить силу вспышки, и по какому критерию отличить более слабое событие от более сильного. Если рассуждать теоретически, без привязки к реальным возможностям, то задача не кажется сложной. По своей фундаментальной природе вспышка – это взрыв, т. е. процесс быстрого высвобождения энергии (как и в большинстве взрывов – предварительно накопленной и запасенной). Соответственно, вспышка может быть охарактеризована просто пол-

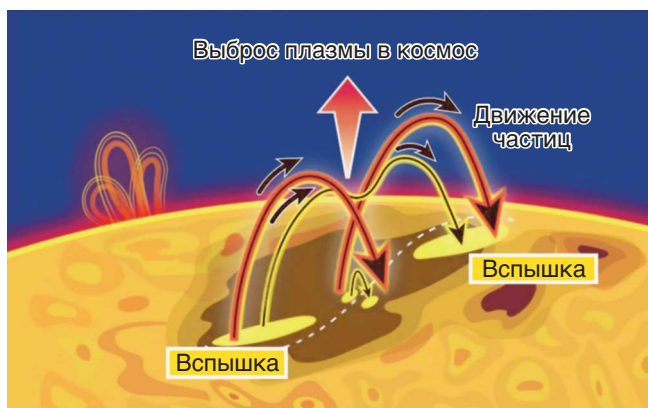


Рис. 1. Схематическая иллюстрация вспышки на Солнце. Взаимодействие магнитных полей приводит к взрыву. Часть энергии высвечивается вниз, формируя «вспышку». Часть выбрасывается в космос в виде облака плазмы, которое может ударить по Земле

ным количеством энергии, которая высвобождается в ходе взрыва. Также, хотя и менее наглядно, можно делить вспышки по скорости высвобождения энергии, то есть по их мощности. Менее нагляден этот способ по той причине, что можно теоретически вообразить средней силы вспышку, но очень короткую по времени, которая займет при такой шкале первое место, обогнав гораздо более крупные, но продолжительные события, что может показаться несправедливым. Поэтому делить вспышки по полной энергии все же выглядит честнее.

Казалось бы, что задача решена. Но нет, до решения еще далеко. Проблема в том, что это на Земле мы можем условно обложить природное явление градусниками и кинокамерами и весьма точно измерить его характеристики, включая энергетические ресурсы. Для явлений, наблюдаемых на Солнце, основным материальным источником информации являются потоки излучения, достигающие орбиты Земли. И хотя сам термин «вспышка» наводит на мысль, что основная энергия события содержится в излучении, это не так. В действительности основная энергия солнечных вспышек изначально содержится в электрических токах, текущих в короне Солнца, а затем, уже в процессе вспышки, преобразуется в иные

формы – в тепло, в кинетическую энергию быстрых частиц, в энергию движения масс вещества, а также и в излучение, которое, однако, составляет лишь небольшую долю полной энергии. Есть и еще одно важное обстоятельство, которое дополнительно осложняет оценку энергетики солнечной вспышки. Оно состоит в том, что в окно прозрачности земной атмосферы проникает лишь относительно небольшая часть электромагнитного спектра, в основном оптический (или видимый) диапазон, а также некоторая часть прилегающего к нему ультрафиолетового и инфракрасного диапазона. Основное же излучение вспышки, как мы сейчас понимаем, лежит в иных, более жестких, областях спектра, которые в принципе не могут быть зарегистрированы наземными приборами.

Теперь, когда мы понимаем, что измерить точно полную энергию вспышки крайне сложно, а по сути невозможно, давайте обсудим, как же все же отличить более крупную вспышку от менее крупной. Можно ли вообще это сделать? Да, конечно, можно, примерно тем же способом, как мы это делаем на Земле для крупных явлений (ураганов и землетрясений), не доступных точному измерению – по внешним признакам события. Примером может служить широко известная шкала

Бофорта, принятая Всемирной метеорологической организацией для приближенной оценки скорости ветра по его воздействию на наземные предметы или по волнению в открытом море. Суть ее состоит в том, что мы сначала на примере нескольких событий устанавливаем соответствие между физическими характеристиками явления (в данном случае скоростью ветра) и видимыми признаками (как качаются ветки деревьев, какой высоты достигают волны). Затем, считая, что эти зависимости носят универсальный характер, решаем уже обратную задачу – по внешним признакам определяем скорость ветра, используя имеющуюся шкалу.

Если вернуться теперь к физике Солнца, то наиболее известными классификациями вспышек, основанными примерно на таких же принципах, являются оптическая и рентгеновская классификации. Оптическая исторически предшествовала рентгеновской, она основана на изучении фотографий солнечных вспышек в одной из линий солнечной хромосферы – фактически это всегда линия водорода H_{α} . Чтобы немного разобраться в сути этой классификации придется несколько углубиться в физику солнечных вспышек. Согласно современным представлениям, вспышка возникает при взаимодействии крупных трубок солнечного магнитного поля с размерами в десятки тысяч километров, которые основаниями уходят в нижние слои солнечной атмосферы – хромосферу, а их вершины располагаются в верхних слоях – в короне Солнца¹. При взаимодействии магнитных трубок в короне возникают сильные электрические поля, которые ускоряют окружающие частицы

корональной плазмы (в основном протоны и электроны)².

Заряженные частицы, покидая область ускорения, движутся вдоль линий магнитного поля, в том числе по направлению к плотной хромосфере, где тормозятся и гибнут, нагревая хромосферу вблизи оснований магнитных трубок. Нагретая хромосфера светится, в том числе в линиях водорода, включая линию H_{α} , что наблюдается на изображениях как возникновение на поверхности Солнца ярких источников излучения. Эти источники могут иметь форму отдельных ядер, но также и протяженную форму, которая часто напоминает широкие ленты. Заметим, что именно эти яркие ядра и ленты, «вспыхивающие» на поверхности Солнца, и дали в свое время название всему явлению – «вспышка». Лишь много позже стало понятно, что эти световые явления не являются самостоятельным физическим процессом, а представляют собой вторичные проявления, а именно реакцию хромосферы Солнца на внешнее воздействие со стороны вспышечных частиц.

Хромосферные ядра и ленты, в силу своего разнообразия, являются неплохим материалом для ранжирования вспышек, и именно они лежат в основе оптической классификации. Согласно этой классификации, вспышка может быть охарактеризована двумя параметрами: площадью вспышечных ядер и лент и их яркостью. В зависимости от площади вспышки делятся на 5 классов: S (самый слабый), затем 1, 2, 3 и 4. В зависимости от площади – на 3 класса: F (слабые), N (средние) и B (сильные). Два этих обозначения объединяются. В результате возникает 15 классов, самым слабым из которых является SF и самым сильным 4B.

¹ Подгорный А.И., Подгорный И.М. Условия возникновения солнечной вспышки // Земля и Вселенная. 2013. № 3. С. 3–16.

² Прист Э., Форбс Т. Магнитное пересоединение. Пер. с англ. М.: Физматлит, 2005.

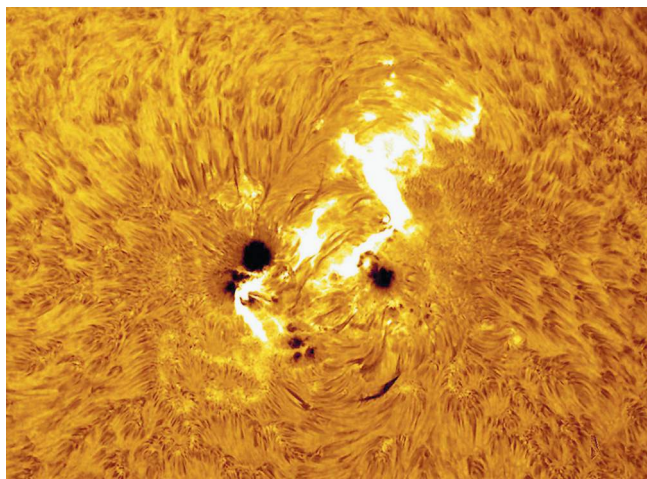


Рис. 2. Яркие источники излучения на поверхности Солнца, которые всегда возникают во время вспышек. Очень часто они имеют вид протяженных лент с размерами более 100 тыс. км

Площадь вспышки, как правило, измеряется в миллионных долях площади полусферы (м.д.п.), хотя допускаются и иные единицы, например, квадратные градусы. В миллионных долях площади полусферы границы между классами проходят следующим образом: класс S – площадь менее 100 м.д.п., класс 1 – площадь от 100 до 250 м.д.п., класс 2 – площадь от 250 до 600 м.д.п., класс 3 – площадь от 600 до 1200 м.д.п., класс 4 – площадь более 1200 м.д.п. Интенсивность вспышки обычно измеряется по отношению интенсивности излучения в ядрах к окружающей невозмущенной хромосфере. Вспышка с относительной интенсивностью 160–260% считается слабой (F), 260–360% – умеренной (N), свыше 360% – яркой (B).

В целом, оптическая классификация представляет собой довольно стройную систему, хотя и не лишена недостатков. Среди них можно отметить проблему определения границ вспышечных ядер и лент (что влияет на площадь), а также некоторую нелинейность, в частности, как понять, какая вспышка является более сильной: 2B или 4N, т. е. что важнее, площадь или интенсивность. В настоящее время классификация все еще широко применяется в наземных

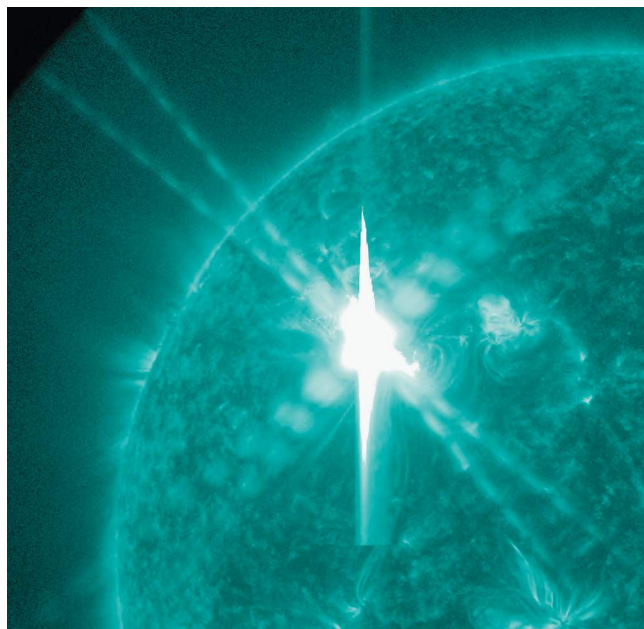
наблюдениях. В то же время в международных каталогах она в значительной степени вытеснена рентгеновской классификацией, основанной на измерениях вспышек из космоса.

Рентгеновская классификация основана на идее, что солнечная вспышка происходит не в вакууме, а в плазменной среде, поэтому существенная доля энергии солнечной вспышки в ходе распространения в этой среде должна преобразовываться в тепло³. Наиболее интенсивное выделение тепла должно происходить в нижних плотных слоях, то есть в хромосфере, но существенная его часть будет выделяться и в короне, в результате кулоновского нагрева⁴ окружающей плазмы корональными токами, а также при торможении распространяющихся здесь вспышечных частиц. Экспериментально и теорети-

³ Богачёв С.А., Ульянов А.С., Кириченко А.С., Лобода И.П., Рева А.А. Солнце под микроскопом – природа вспышек, микро- и нановспышки // Земля и Вселенная. 2021. № 4. С. 24–34.

⁴ Нагрев проводника (или среды) при протекании через них электрического тока. Этим механизмом объясняется, например, нагрев настольных компьютеров и ноутбуков во время работы, а также свечение спирали накаливания электрической лампочки.

Рис. 3. Вспышка в солнечной короне. Яркий источник излучения формируется горячей плазмой с температурой более 10 млн градусов. Излучение такой плазмы лежит в основе рентгеновской классификации вспышек



чески можно показать, что характерные температуры, до которых нагревается вспышечная плазма, составляют от нескольких миллионов до десятков миллионов градусов. Основное тепловое излучение плазмы с такой температурой лежит в мягкой рентгеновской области спектра в диапазоне длин волн от 1 до 10 Å (0.1–1 нм) и является очень интенсивным.

Мягкое рентгеновское излучение Солнца полностью поглощается в атмосфере Земли и в принципе не может быть обнаружено путем измерений с земной поверхности, однако доступно для космических наблюдений. Измеряя потоки излучения в соответствующем диапазоне, можно сделать вывод об объеме нагретой в результате вспышки плазмы, что, в свою очередь, характеризует полную энергию вспышки. Существует еще одно важное обстоятельство, которое делает данный способ особенно привлекательным. Оно состоит в том, что плазма с температурой от нескольких миллионов градусов и выше отсутствует в спокойной короне Солнца.

По этой причине соответствующее тепловое излучение в заметных количествах возникает только во время вспышек, что делает его хорошим маркером для вспышечных процессов.

Основным источником данных для построения рентгеновской классификации является серия геостационарных спутников GOES, находящихся в ведении американской информационной службы по космическим данным об окружающей среде (NESDIS), созданных по заказу NOAA (аналог Росгидромета в США) и осуществляющих в числе прочего непрерывный мониторинг солнечного излучения в диапазоне 1–8 Å⁵. Данная классификация содержит 5 уровней, обозначаемых буквами А, В, С, М и Х. Класс А включает вспышки, для которых поток излучения, измеренный GOES в диапазоне 1–8 Å составляет от 10⁻⁸ до 10⁻⁷ Вт/м². Для класса В соответственно это от

⁵ Ангстрем (Å) – внесистемная единица измерения длин волн, широко применяемая в астрофизике (1 Å = 10⁻¹⁰ м).

10^{-7} до 10^{-6} Вт/м² и так далее. Вспышкам высшего балла X соответствуют потоки выше 10^{-4} Вт/м². Множитель перед цифрой 10 ставится после буквенного обозначения. Например, поток 5.6×10^{-8} Вт/м² соответствует классу A5.6, и так далее по аналогии. Класс X не имеет верхней границы. Так вспышка с потоком 10^{-3} Вт/м² не получит никакой новой буквы, а будет обозначена как X10. К достоинствам данной классификации можно отнести ее линейность, простоту интерпретации, а также высокую стабильность ряда данных, не зависящую от индивидуальных особенностей наблюдателя или особенностей измерительной аппаратуры. В настоящее время данный способ ранжирования вспышек является доминирующим.

САМЫЕ КРУПНЫЕ СОБЫТИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ИСТОРИИ

Наличие принятых классификаций солнечных вспышек дает возможность составить список наиболее крупных событий в современной истории. Мы будем использовать для этого классификацию GOES. Список составлен на основе данных NOAA с 1996 г. и содержит топ 20 событий. Следует заметить, что для ряда крупных вспышек определить точный балл невозможно, поскольку потоки их излучения были настолько высоки, что вышли за пределы достоверного диапазона измерений аппаратуры GOES. Для таких событий балл приведен с пометкой «не ниже».

Место	Балл	Активная область	Дата, UT	Время, UT		
				начало	окончание	максимум
1	X40 (не ниже)	0486	2003/11/04	19:29	19:53	20:06
2	X28 (не ниже)	9393	2001/04/02	21:32	21:51	22:03
3	X24 (не ниже)	0486	2003/10/28	09:51	11:10	11:24
4	X28 (не ниже)	0808	2005/09/07	17:17	17:40	18:03
5	X20 (не ниже)	9415	2001/04/15	13:19	13:50	13:55
6	X14.36	0486	2003/10/29	20:37	20:49	21:01
7	X13.37	2673	2017/09/06	11:53	12:02	12:10
8	X12.97	8100	1997/11/06	11:49	11:55	12:01
9	X12.95	0930	2006/12/05	10:18	10:35	10:45
10	X11.96	0486	2003/11/02	17:03	17:25	17:39
11	X11.88	2673	2017/09/10	15:35	16:06	16:31
12	X10.18	0720	2005/01/20	06:36	07:01	07:26
13	X9.96	1263	2011/08/09	07:48	08:05	08:08
14	X9.4	0930	2006/12/06	18:29	18:47	19:00

Место	Балл	Активная область	Дата, UT	Время, UT		
				начало	окончание	максимум
15	X8.9	9733	2001/12/13	14:20	14:30	14:35
16	X8.87	0808	2005/09/09	19:13	20:04	20:36
17	X8.79	3664	2024/05/14	16:46	16:51	17:02
18	X8.21	9077	2000/07/14	10:03	10:24	10:43
19	X8.08	9415	2001/04/06	19:10	19:21	19:31
20	X7.79	1429	2012/03/07	00:02	00:24	00:40

Можно в первую очередь отметить тот «неутешительный» факт, что событие от 14 мая 2024 г., ставшее поводом для данного обзора, занимает в списке самых больших вспышек с 1996 г. всего лишь 17-е место, что в некотором смысле достаточно ясно характеризует текущий цикл пока как относительно слабый. В целом, в разбивке по солнечным циклам, список выглядит следующим образом: 23-й солнечный цикл, который длился с 1996 по 2008 г., – 15 событий, 24-й (с 2008 по 2019 г.) – 4 события, 25-й (с 2019 г. по настоящее время) – 1 событие.

Наиболее продуктивной солнечной областью за этот период стал центр 0486, наблюдавшийся на Солнце в конце октября – начале ноября 2003 г. и произведший четыре гигантские вспышки с номерами 1, 3, 6 и 10. На второе место мы ставим область 0808, наблюдавшуюся в начале мая 2005 г. В ее активе два топ события с номерами 4 и 16. На третьем месте нашего рейтинга область 9415 (апрель 2001 г.) – вспышки с номерами 5 и 19. И на четвертом месте область 2673 (сентябрь 2017 г.) – вспышки с номерами 7 и 11. Можно заметить, что три наиболее продуктивных активных центра относятся к 23-му циклу.

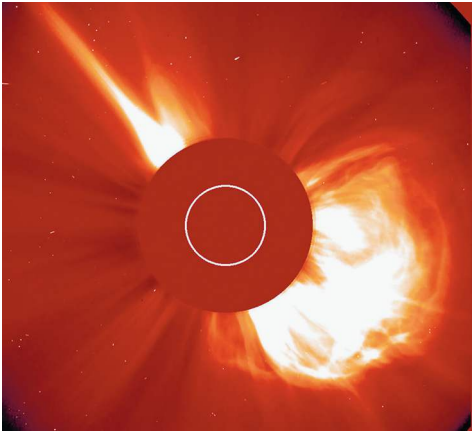


Рис. 4. Выброс солнечной плазмы во время солнечной вспышки X40, произошедшей 4 ноября 2003 г. Фотография получена космической солнечной обсерватории SOHO с помощью коронографа LASCO

ВОЗМОЖНЫ ЛИ НА СОЛНЦЕ СУПЕРВСПЫШКИ?

Этот вопрос, безусловно, отчасти спекулятивный. Ответить на него теоретически довольно трудно, поскольку мы пока плохо понимаем механизм накопления вспышечной энергии, и есть ли у него ограничители сверху. Иными словами, может ли вспышечная энергия накапливаться в активном центре

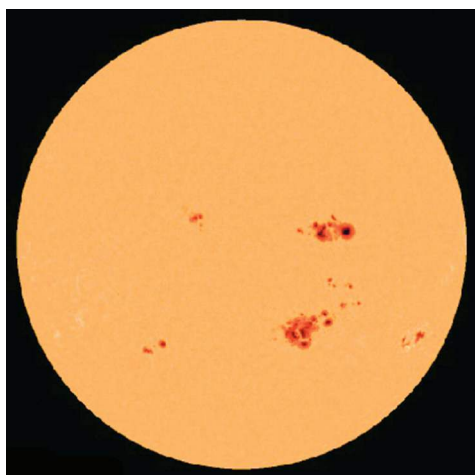


Рис. 5. Вид Солнца 30 октября 2003 г. в период рекордных солнечных вспышек. Крупная группа пятен к югу от экватора – активная область 0486, которая произвела топ 1 и топ 3 вспышки в списке крупнейших событий, представленном в работе

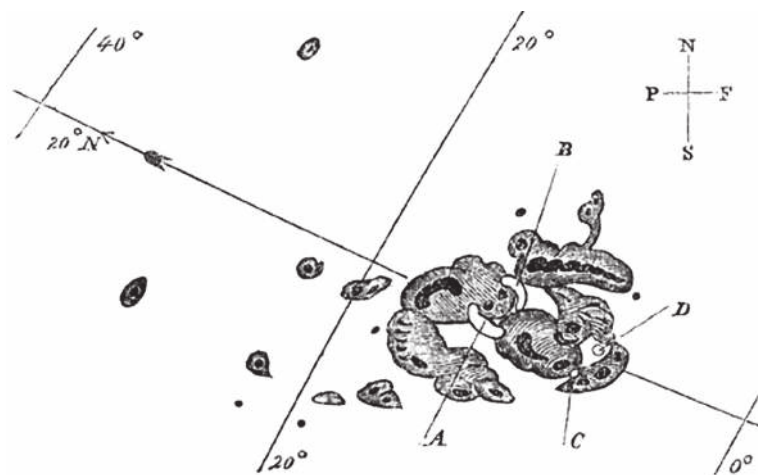


Рис. 6. Зарисовка группы солнечных пятен, вызвавших событие Кэррингтона 1 сентября 1859 г.

неограниченно, или при достижении какого-то порога неизбежно происходит срыв. Ввиду отсутствия теории, анализ сводится в основном к исследованию имеющихся экспериментальных рядов и попыткам их экстраполяции в области очень больших энергий.

За время пока не очень продолжительной истории научного исследования Солнца (это менее 200 лет) наиболее крупной вспышкой считается событие Кэррингтона по имени ученого, наблюдавшего его 1 сентября 1859 г. Впрочем, силу вспышки по имеющимся данным и описаниям установить почти невозможно, и главное, чем запомнилось данное событие, – это исклю-

чительно крупной магнитной бурей⁶. Хотя событие Кэррингтона и является

⁶ Одна из сильнейших зафиксированных геомагнитных бурь за всю историю наблюдения. Английский астроном Ричард Кэррингтон первым сообщил о мощной солнечной вспышке, наблюдавшейся в оптический телескоп в окрестностях одного из солнечных пятен и сопровождавшейся крупным выбросом массы в сторону Земли. В ночь на 2 сентября на всех широтах, в том числе вблизи экватора, люди наблюдали редкое по яркости северное сияние. По сообщениям того времени, серьезный ущерб понес телеграф, по всей Европе и Северной Америке массово выходила из строя связь. Оборудование и телеграфные кабели загорались, вызывая пожары, а операторы получали поражения электрическим током.

наиболее часто упоминающимся, оно по современным данным не является единственным таким за последние два столетия. Есть основания полагать, что всего через 13 лет после того, как Кэррингтон наблюдал свою вспышку, случилась еще одна магнитная буря, которая по некоторым меркам могла превзойти событие Кэррингтона. Речь о магнитной буре 1872 г., которая, основываясь на полярных сияниях и редких измерениях магнитометра, могла быть даже масштабнее, чем ее предшественница.

Наконец, геомагнитную бурю, сравнимую с событием Кэррингтона, Солнце устроило нашей планете также в мае 1921 г., когда полярное сияние в очередной раз спускалось в экваториальные зоны планеты. Телеграфные и телефонные системы в тот раз также вышли из строя, некоторые из них стали причиной разрушительных пожаров. Все это указывает на то, что событие Кэррингтона не было «черным лебедем» и может повториться с довольно высокой вероятностью.

Можно заметить, что события в десятки и даже сотни раз более мощные, чем вспышки Кэррингтона происходят и фиксируются на других звездах. Там, если на планете, вращающейся вокруг ближайшей к нам звезды Проксима Центавра, существует жизнь, ей, вероятно, приходится нелегко. События масштаба Кэррингтона происходят там чуть ли не ежедневно. В 2019 г. группа астрономов из университета Колорадо зарегистрировала на этой звезде вспышку в 100 раз более сильную, чем вспышка Кэррингтона всего через 40 часов после начала наблюдений. Впрочем, справедливости ради надо заметить, что Проксима Центавра не похожа на Солнце. Это красный карлик класса М, то есть звезда, более холодная, чем Солнце, и имеющая гораздо меньший размер. А эти крошечные



Рис. 7. Полярное сияние. Вид из космоса. После крупных солнечных вспышек область сияний может опускаться до средних широт (40–60°), а в исключительных случаях – до экватора

звезды славятся своими огромными вспышками.

В то же время супервспышки ловятся и на звездах, подобных Солнцу⁷. Так космический телескоп Kepler (2009–2018), специально предназначенный для поиска экзопланет и исследовавший более чем 100 тыс. звезд, за несколько лет работы зарегистрировал 26 вспышек, превышавших событие Кэррингтона в 100 раз на 15 солнцеподобных звездах. Примерно такой же темп частоты супервспышек обнаружил и второй известный охотник за экзопланетами на орбитах вокруг ярких звезд – космический телескоп TESS. Если принимать эти данные как основу для анализа, то можно сделать вывод, что вспышки, подобные Кэррингтоновским, происходят 2–3 раза за столетие, а в 100 раз мощнее, чем вспышка Кэррингтона, происходят на звездах типа Солнце примерно раз в 6000 лет.

Можно ли это как-то подтвердить? В определенном смысле да. Исключительно точными аккумуляторами данных о солнечной активности и в целом о состоянии окружающей среды

⁷ Гершберг Р.Е. Солнечная активность в мире звезд. М.: Знание, 1990.

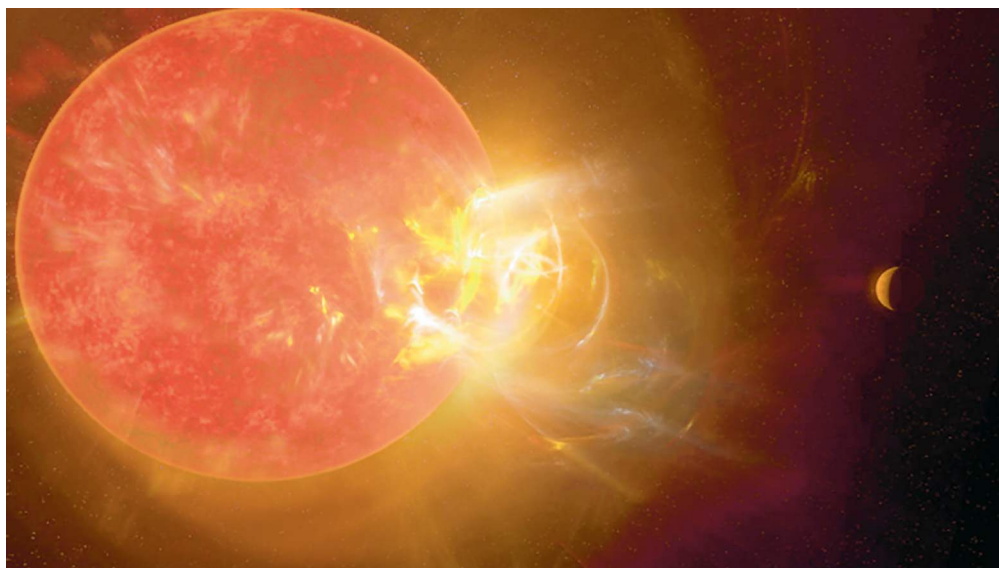


Рис. 8. Художественное изображение гигантской вспышки на звезде Проксима Центавра, расположенной в 4,244 св. года от Земли

являются деревья, у которых каждый год соответствующая информация накапливается в соответствующем годовом кольце. Из анализа этих колец можно реконструировать сцены из прошлого Земли. Так, в древесине японского кедра учеными зафиксированы значительные всплески углерода-14 (радиоактивный изотоп углерода) летом 774 г. и весной 993 г. Некие относительно краткосрочные события привели к разовому накоплению деревьями количества углерода-14, которое превышает полное годовое накопление в несколько раз. Углерод-14 возникает в результате столкновений между атмосферным азотом и нейтронами космических лучей – высокоскоростными частицами из космоса, которые ежедневно бьют по нашей планете.

Одним из основных источников космических лучей нужных энергий являются солнечные вспышки. Ледяные керны из Антарктиды показали соответствующее повышение уровня берил-

лия-10, еще одного продукта космических лучей, как в 993 г., так и в 774 г., что добавило еще больше уверенности в результатах исследования годовичных колец деревьев. Заглядывая дальше назад во времени, изучение ледяных кернов предполагает третье подобное событие около 660 г. до н.э. А пару лет назад исследователи сообщили о двух дополнительных всплесках углерода-14 в кольцах деревьев примерно в 7176 г. до н.э. и 5259 г. до н.э. Не исключено, что все это следы солнечных супервспышек. При этом событие 774 г., не исключено, является самой сильной солнечной вспышкой за последние 12 тыс. лет.

МОЖНО ЛИ ЖДАТЬ СУПЕРВСПЫШЕК В ТЕКУЩЕМ СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ?

Вопрос о том, могут ли суперспышки произойти в ближайшие годы, довольно сложный. Мы не понимаем до кон-

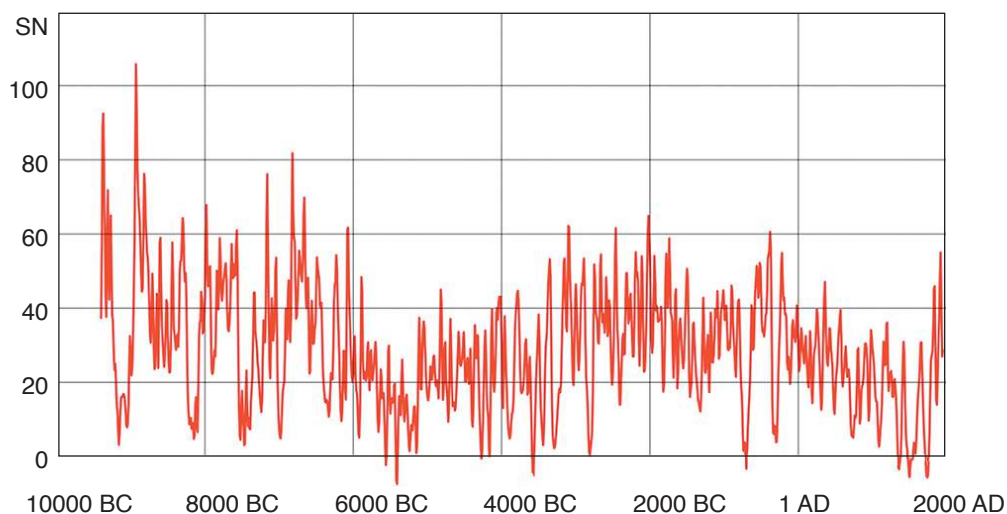


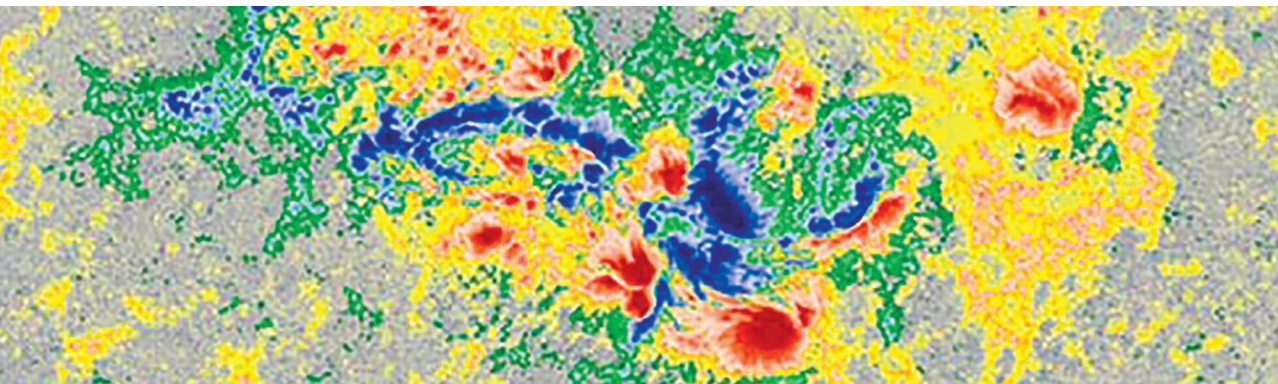
Рис. 9. Реконструкция среднего уровня солнечной активности за последние 12 тыс. лет по измерениям содержания углерода-14 в растениях и антарктических льдах

ца механизма обычных вспышек и уж тем более не понимаем причин супервспышек. Два-три года назад, когда текущий солнечный цикл только начинался, 99 ученых из 100 уверенно дали бы на этот вопрос отрицательный ответ. В тот момент представлялось, что будущий цикл станет одним из самых слабых в современной истории и уж точно не будет способен на формирование крупных событий. Исходя из сегодняшней ситуации, вопрос не кажется уже таким тривиальным.

Прежде всего, сам факт формирования в этом цикле магнитной бури высшего, 5-го, уровня уже маркирует данный цикл как весьма сильный. Можно отметить, что в предыдущем 24-м цикле таких событий не было ни одного. Кроме того, летом 2024 г. индекс солнечного цикла превысил порог 200 и достиг уровня 215. Это еще далеко от рекордных значений в истории, но уже на 50% выше, чем максимум 24-го цикла и всего на 15% ниже, чем пик 23-го цикла, который пока

является крупнейшим в текущем столетии. В таком контексте вероятность супервспышек уже не выглядит равной нулю. В то же время, преувеличивать силу цикла также не стоит. Так, в 1950-х гг. индекс солнечного цикла превышал порог 300, но событий масштаба Кэррингтона не последовало. Не исключено, что прямой связи между силой цикла и вероятностью таких событий вообще нет. В частности, можно заметить, что 3 из 4 вспышек, занимающих первые места в списке крупных событий, произошли на фоне спадающей солнечной активности примерно через два года после прохождения Солнцем пика 23-го цикла. Также можно заметить, что самые крупные вспышки предыдущего цикла произошли осенью 2017 г., через три года после пика активности и всего лишь за 1.5 года до достижения Солнцем очередного минимума. Так что время и возможности для супервспышек у Солнца пока есть, а будут они или нет – покажет лишь время.

О СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ ЗАМОЛВИТЕ СЛОВО



ЛОБОДА Иван Петрович,

кандидат физико-математических наук

Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/S0044394824060057

Поступила в редакцию: 30.09.2024

Принята к публикации: 30.09.2024

Солнце – это не только источник всего живого на нашей планете, но и обладающее собственной таинственной, подчас весьма бурной внутренней жизнью небесное тело. Его магнитное сердце бьется то сильнее, то слабее, делая в среднем один удар за десятилетие – педантичные ученые называют этот пульс 11-летним циклом активности Солнца. Какова природа и внешние проявления солнечного цикла, как сильно он влияет на нашу повседневную жизнь и есть ли способ предугадать следующий удар – в этом мы сейчас и попробуем разобраться.

Солнце волнуется – раз!

Солнце волнуется – два!

Солнце волнуется – три!

Солнечный цикл на месте замри!

(веселая игра, популярная в среде гелиофизиков)

ОБМАНЧИВОЕ ПОСТОЯНСТВО

Ничто не ново под Солнцем – так, по крайней мере, сказано в книге Экклезиаста [Ек.1:9]. (Лишь многим позже, с легкой руки словообильного Н.М. Карамзина, Солнце невзначай превратилось в Луну, и уже в таком, чуть более поэтическом виде, фраза дошла до большинства наших соотечественников.)

Разумеется, неоткуда было древнему иудею знать ни о реакциях ядерного нуклеосинтеза, ни о современной теории звездной эволюции, ни о парадоксе слабого молодого Солнца, иначе он бы, возможно, подыскал другую метафору к вечности.

Впрочем, его тоже можно понять, ведь со времен всемирного потопа светимость Солнца выросла на какие-то 0.00002% – ничтожно мало даже для

современных сверхчувствительных радиометров. Такое очень медленное изменение яркости связано с постепенным «выгоранием» водорода в ядре Солнца и начнет сказываться на нас, жителях планеты, где-то через миллиард лет (а по некоторым оценкам – и через все полтора). Тогда рост средней температуры и самоусиливающийся парниковый эффект приведут к полному испарению океанов, после чего привычная жизнь на Земле станет уже невозможной. Однако все это забота следующих, еще далеких от нас поколений.

Но и в масштабе жизни отдельно взятого человека Солнце не столь уж неизменно, как может показаться. Ведь оно, как и многие другие светила, является переменной звездой, а для наблюдателя, обозревающего его из глубин космоса в рентгеновский или радиотелескоп, – и сильнопеременной, изменяющей свою яркость в сотни и тысячи раз в ходе так называемого 11-летнего солнечного цикла. Более того, во время мощных солнечных вспышек такие изменения могут происходить на масштабе часов и даже минут – о каком постоянстве тут может идти речь?

Конечно, рентген и радиоизлучение – очень малая часть излучения Солнца, но и полная его светимость, сконцентрированная преимущественно в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, меняется в ходе 11-летнего цикла примерно на 0.1%, что уже хорошо фиксируется современными приборами и даже оказывает, пускай и не очень значительное, воздействие на климат планеты.

ЗАГАДОЧНЫЕ ДЫРЫ НА СОЛНЦЕ

Наблюдения в рентгене, требующие выхода за пределы земной атмосферы, а также радионаблюдения Солнца начались по историческим меркам совсем недавно: во второй половине XX века, с бурным развитием радарной и ракетной техники после Второй мировой войны. Тем более удивительно, что солнечная цикличность была открыта человечеством задолго до этого. Дело в том, что ход 11-летнего цикла характеризуется не только колебаниями светимости Солнца в различных спектральных диапазонах, но и изменением числа солнечных пятен – небольших, более холодных и, как

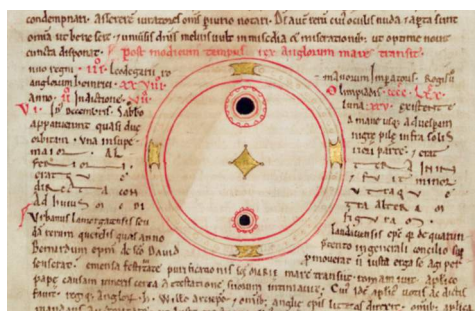


Рис. 1. Наиболее раннее известное изображение пятен на Солнце в хронике Иоанна Вустерского от 8 декабря 1128 г. (слева) и рисунок солнечных пятен из китайской астрономической рукописи XV века Тяньюань Юйли Сянифу (справа). Изображения из архива Бодлианской библиотеки в Оксфорде, <https://digital.bodleian.ox.ac.uk/objects/93b83416-7972-40d7-9789-18f54e17ae25/surfaces/d57cbc42-a272-4088-a6c6-3f28ea8dec0c>, и из Национального архива Японии, <https://www.digital.archives.go.jp/img/4772218>, сmp. 44

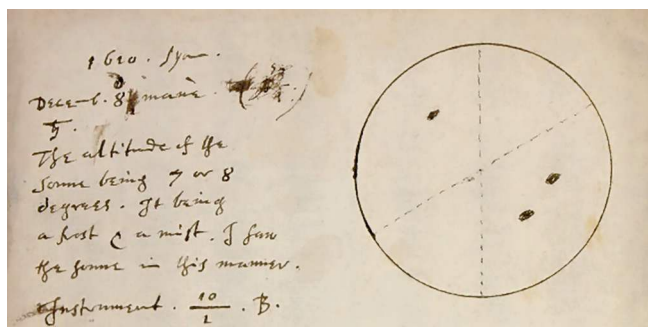


Рис. 2. Первая зарисовка размера и положения пятен на диске Солнца, выполненная Томасом Хэрриотом 8 декабря 1610 г. Изображение из архива Института истории науки им. Макса Планка, <https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/library/E3FVUFB5B-viewMode=image&pn=5>

следствие, более темных участков его поверхности, самые крупные из которых могут наблюдаться невооруженным глазом – например, сквозь дымку или туман.

Так, первые летописные свидетельства наблюдения солнечных пятен появляются в китайской «Книге перемен», составленной около XVIII века до н.э., а первое известное изображение, пускай и весьма условное – в английской хронике Иоанна Вустерского в 1128 г. В отечественной историографии такие свидетельства тоже встречаются, первое – в Никоновской летописи второй половины XIV века. Разумеется, в те, не столь уж далекие времена появление пятен на Солнце истолковывалось исключительно как дурное предзнаменование, и вызывало скорее ужас, нежели здоровый научный интерес.

Но прогресс не стоит на месте, и с XIV века солнечные пятна уже периодически наблюдались учеными, например, при помощи камеры-обскуры. Ну а после изобретения телескопа в начале XVII века, совпавшего с популяризацией гелиоцентрической модели мира и общеевропейским ростом интереса к астрономии, наблюдения пятен на Солнце стали если не систематическими, то уже весьма многочисленными и регулярными. Во многом такое повышенное внимание было обусловлено поиском новых тел, обращающихся вокруг Солнца (так, великий

Иоганн Кеплер принял солнечное пятно за транзит Меркурия). Это требовало большей тщательности и высокой, чуть ли не ежедневной частоты наблюдений, чего, увы, не всегда удается достичь из-за погодных условий.

Первый современный рисунок, более или менее точно отражающий размер и положение пятен на диске Солнца, сделал англичанин Томас Хэрриот в декабре 1610 г., лишь немногим опередив Галилея и других выдающихся мужей своей эпохи. Среди них можно особо выделить немецкого иезуита и, по совместительству, астронома Христовора Шейнера, сконструировавшего гелиоскоп и фактически поставившего наблюдение солнечных пятен на поток. В конечном счете был накоплен достаточный объем данных, чтобы установить, что пятна принадлежат самому Солнцу и обращаются вместе с ним. Это позволило определить направление оси и период собственного вращения Солнца, составляющий на средних гелиоширотах чуть менее месяца.

Однако большего такие поверхностные наблюдения дать не могли, в том числе не позволяли они хоть сколь-нибудь достоверным образом установить физическую природу пятен. (Что, впрочем, ничуть не ограничивало человеческую фантазию. На протяжении последующих трех веков выдвигались самые различные предположения: например, что пятна – это подобие

солнечных облаков или даже проплешины в огненной атмосфере Солнца, через которую видна его твердая поверхность.) Из-за этого, а также из-за нерегулярности появления пятен на диске, то появляющихся, то вдруг исчезающих в течение нескольких оборотов Солнца, интерес к ним начал угасать, и к XVIII веку наблюдения пятен снова становятся отрывочными.

Новый виток интереса к наблюдению пятен на Солнце начался уже в XIX веке в связи с поисками гипотетической планеты Вулкан, существованием которой пытались объяснить обнаруженную в то время аномалию прецессии орбиты Меркурия. (Увы, ответ на этот вопрос пришлось ждать еще около сотни лет, до появления общей теории относительности Эйнштейна.) Особой прилежностью в этих поисках отличился астроном-любитель Генрих Швабе, считавший, что при наличии достаточно большого числа наблюдений он сможет выделить регулярные транзиты загадочной планеты среди хаотично появляющихся на солнечном диске пятен. В течение 20 лет он кропотливо регистрировал каждое пятнышко на Солнце, но восьмой планеты, к своему большому огорчению, так и не открыл (этой чести удостоилась тройка французов в 1846 году). Вместо этого он обнаружил, что, несмотря на большой разброс, среднее число пятен не постоянно, а меняется циклическим образом на масштабе десятилетий.

Вскоре открытием Швабе заинтересовался уже профессиональный астроном, тогдашний директор Бернской обсерватории Рудольф Вольф, принявшийся за дело со всей научной обстоятельностью. В первую очередь он разыскал все доступные ему записи предшествующих наблюдений, таким образом удалось проследить непрерывную череду циклов вплоть до 1749 г., откуда он и начал свою

нумерацию, используемую по традиции до сих пор. Для унификации разрозненных наблюдений он ввел удобный количественный показатель, называемый теперь его именем – число Вольфа, позволяющее учитывать различия в технике у отдельных наблюдателей. Ведь в хороший телескоп всегда видно больше деталей, в том числе и мелких солнечных пятен.

Дело Рудольфа Вольфа продолжили другие выдающиеся астрономы в Федеральной обсерватории в Цюрихе – Альфред Вольфер, Отто Бруннер и Макс Валдмайер; в середине XX века основное место наблюдений было перенесено в Королевскую обсерваторию Бельгии. С тех пор наблюдения ведутся ежедневно, причем по возможности собираются данные из нескольких обсерваторий (хоть где-нибудь, да должно повезти с погодой). Эти значения потом усредняются до общемирового числа Вольфа, называемого поэтому также международным или стандартным числом солнечных пятен. Вследствие появления и исчезновения сразу целых групп пятен на солнечном диске, в том числе и в результате вращения Солнца, измеряемое ежедневно число пятен часто резко меняется. Поэтому для определения минимума и максимума цикла число Вольфа обычно усредняется за год, из-за чего эти моменты определяются с большим запозданием – не менее полугода.

МАГНИТНЫЙ ПУЛЬС СОЛНЦА

Несмотря на столь тщательные и детальные наблюдения, пятна на Солнце представляли весьма отвлеченный интерес, пока не была понята их истинная, т. е. физическая природа. Первый важный ключ к решению этой проблемы дало изобретение в 1908 г. американским астрофизиком Джорджем

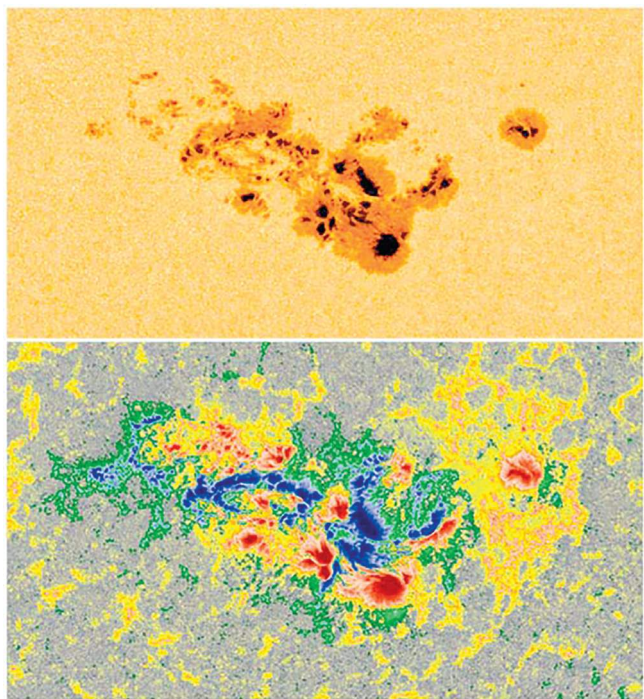


Рис. 3. Изображение группы солнечных пятен (сверху) и карта магнитного поля того же участка поверхности Солнца (снизу), полученные магнитографом HMI Обсерватории солнечной динамики (SDO). Изображение с сайта <https://www.spaceweatherlive.com/ru/news/view/531/20240508-sunspot-region-3664-major-flares-and-cmes.html>

Хейлом магнитографа – по сути, специализированного спектрографа, позволяющего по расщеплению спектральных линий оценить силу магнитного поля в месте их формирования. Уже первые измерения показали, что солнечные пятна всегда совпадают с выходящими на поверхность Солнца концентрациями магнитного поля, сила которого в тысячи раз превосходит земное.

Наличие сильного магнитного поля в пятнах хорошо объясняет, почему они выглядят существенно (примерно в 5–10 раз) более темными, чем окружающий их солнечный диск. Как известно из школьного курса физики, заряженные частицы не могут свободно

двигаться поперек линий магнитного поля, вместо этого закручиваясь вокруг них по спирали. А плазма, из которой целиком состоит наше Солнце, как раз и представляет собой «бульон» из таких частиц, в результате чего, выражаясь профессиональным жаргоном, магнитное поле оказывается «вмороженным» в вещество, и либо тянет его за собой, либо наоборот, потоки вещества уносят за собой магнитное поле, тут уж кто кого пересилит.

Внешняя оболочка Солнца – так называемый конвективный слой – находится в непрерывном движении: небольшие объемы его вещества то поднимаются, то снова опускаются, совсем как вода в кипящем чайнике. Так конвекция переносит энергию из раскаленных недр Солнца к его поверхности, где

она вырывается в космическое пространство в виде излучения. Сильное магнитное поле не дает веществу завершить этот цикл: двигаясь вдоль силовых линий вверх, оно уже не может вернуться обратно, из-за чего процесс конвекции останавливается, а с ним практически прекращается и подвод энергии к поверхности Солнца. Как следствие, соответствующий ее участок остывает и светится уже заметно менее ярко.

Но, как это часто бывает в научной практике, после ответа на один вопрос сразу возникает море других: в первую очередь, почему магнитное поле Солнца имеет такую сложную и нерегулярную форму, и почему так странно

меняется со временем? Разумеется, какое-то магнитное поле было заключено изначально в том молекулярном облаке, из которого сформировалось Солнце (вследствие все того же эффекта «вмороженности»). Но при таких темпах расходования надолго бы его не хватило, да и структуру он имело бы гораздо более простую. Очевидно, в глубине Солнца должен действовать некий механизм, усиливающий и искажающий магнитное поле, а по законам электродинамики такой процесс должен быть непременно связан с движением заряженных частиц, т. е. солнечного вещества.

И действительно, в настоящее время достоверно установлено, что в недрах Солнца действует механизм магнитного динамо, названного так по аналогии с хорошо известными всем динамо-машинами, преобразующими механическую энергию в энергию электромагнитного поля, в случае Солнца – поля чисто магнитного. Справедливости ради, все детали этого процесса мы не понимаем до сих пор, лишь в общих чертах представляя физику явления. Недаром именно теории солнечного динамо посвящена львиная доля работ по физике Солнца, а природа солнечной цикличности составляет один из главных нерешенных вопросов гелиофизики.

Основным источником энергии при этом является вращение Солнца, причем вращение дифференциальное: на разных широтах его внешняя оболочка вращается с разной скоростью, быстрее всего у экватора, постепенно замедляясь к полюсам. Из-за этого слои вещества на различных широтах постепенно смещаются друг относительно друга, растягивая «вмороженные» в них силовые линии поля в направлении своего движения и увеличивая тем самым общую энергию магнитного поля. Несколько меньший вклад

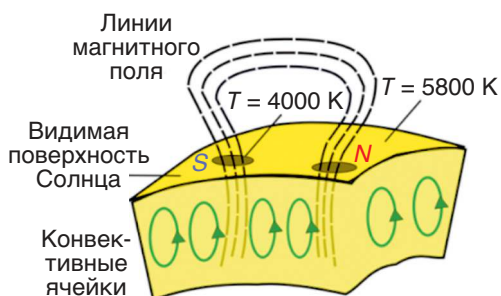


Рис. 4. Формирование пятен на поверхности Солнца в местах выхода концентраций магнитного поля. Адаптированное изображение с сайта https://auger.org/education/Auger_Education/solaractivity.html

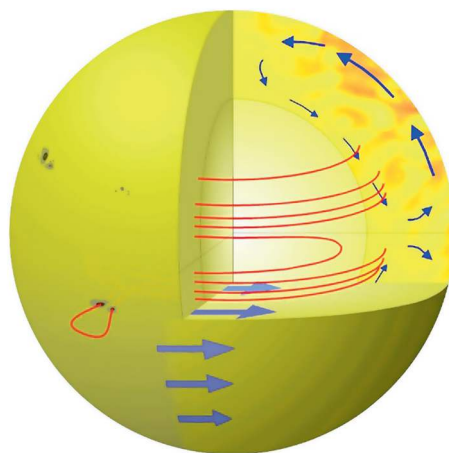


Рис. 5. Дифференциальное вращение солнца (голубые стрелки), приводящие к «наматыванию» линий магнитного поля (показаны красным) вокруг оси вращения Солнца, а также меридиональные циркуляции вещества (темно-синие стрелки), обеспечивающие широтный перенос магнитного поля в ходе солнечного цикла. Адаптированное изображение с сайта Потсдамского астрофизического института им. Лейбница, https://www.aip.de/image_archive/Sun.html

дают хаотичные, но зато более интенсивные конвективные движения, также сдвигающие соседние объемы вещества в противоположных направлениях.

Концентрируясь и усиливаясь таким образом, магнитное поле создает

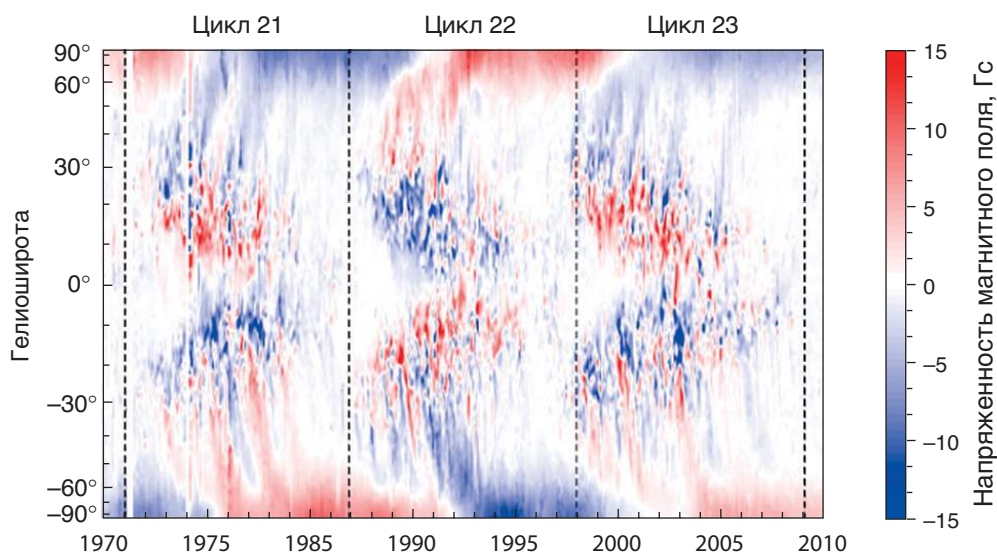


Рис. 6. Смещение концентраций магнитного поля по широте в течение нескольких солнечных циклов. Адаптированное изображение из работы G.J.D. Petrie «Polar Photospheric Magnetic Field Evolution and Global Flux Transport», <https://doi.org/10.1007/s11207-023-02134-5>

добавочное давление на газ заряженных частиц, что в условиях гидростатического равновесия приводит к понижению плотности вещества. Под действием силы Архимеда оно начинает всплывать на поверхность Солнца, унося с собой магнитное поле и вытягивая его в виде петель. Собственно, места выхода этих петель на солнечную поверхность мы и наблюдаем в виде солнечных пятен, и именно поэтому пятна всегда появляются парами (а также более сложными группами) с противоположной полярностью поля – как ни крути, силовые линии поля должны оставаться замкнутыми.

После выхода магнитного поля на поверхность существенное менее плотное вещество солнечной короны уже не ограничивает движение силовых линий, и они начинают жить собственной жизнью. Одно из наиболее ярких проявлений такой свободы – солнечные вспышки, в которых поля противоположной полярности взаимно сокращаются, сбрасывая запасенные в них

излишки энергии. При этом магнитные петли над парами пятен разрываются, и одна часть силовых линий переключается на пятна из противоположного полушария, а другая – на полюса Солнца. Освободившись таким образом от своих собратьев, магнитные концентрации начинают дрейфовать в противоположных направлениях – либо в сторону экватора, где они в конечном счете встречаются и аннигилируют со своими антиподами, либо в область высоких широт, постепенно замещая собой полярность, доминировавшую там в начале цикла.

В результате магнитное поле Солнца, в начале цикла напоминающее поле огромного постоянного магнита, переворачивается, однако совсем не так, как это бы сделал обычный магнит. По мере роста числа пятен глобальная структура поля хаотизируется, и уже нельзя больше сказать, где у Солнца магнитный юг, а где север. Позже, к концу цикла, из этой неразберихи соберется новое однонаправленное поле,

но уже противоположного знака. В следующем цикле этот процесс повторяется снова, и магнитное поле Солнца опять возвращается к своему прежнему состоянию. Поэтому с физической точки зрения корректнее говорить не об 11-летнем, а скорее о 22-летнем солнечном цикле, для различения также называемого магнитным.

Почему солнечный цикл имеет характерный период около 11 лет – тоже открытый вопрос. Долгое время ученые умы смущал (и отчасти продолжает смущать до сих пор) тот факт, что этот интервал близок к периоду обращения крупнейшей планеты, Юпитера, составляющему 11.9 лет. Однако воздействие Юпитера на Солнце настолько слабо, что вызывает приливные волны на его поверхности высотой не более 1 мм, и в лучшем случае может лишь незначительно модулировать уже идущие в его толще процессы. Гораздо интереснее тот факт, что период цикла практически совпадает со временем циркуляции так называемых меридиональных потоков, движущихся в конвективном слое Солнца от экватора к полюсам и обратно, и играющих существенную роль в описанном выше переносе магнитных потоков.

ТАКОЙ РАЗНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ

По мере того, как накапливался объем наблюдательных данных, человечество начало осознавать, что загадоч-

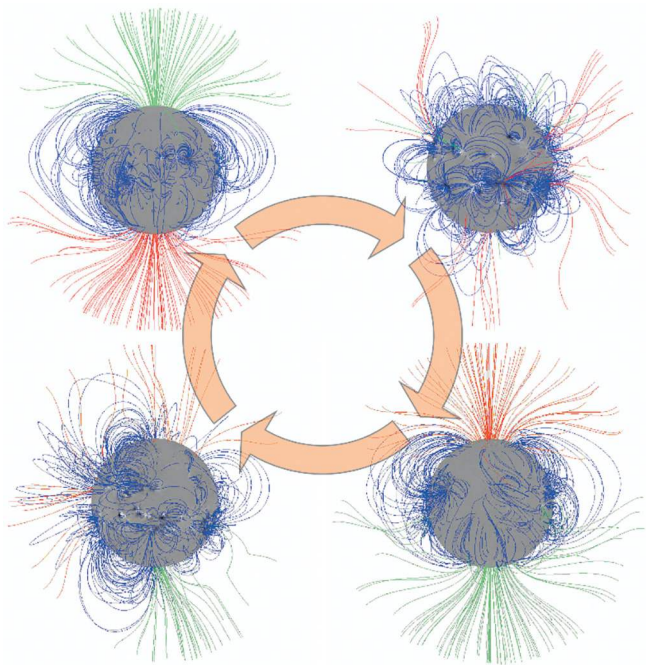


Рис. 7. Переворот магнитного поля Солнца в ходе полного 22-летнего цикла. Адаптированное изображение из работы G.J.D. Petrie «Solar Magnetic Activity Cycles, Coronal Potential Field Models and Eruption Rates», <https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/2/162>

ные пятна на Солнце оказывают вполне реальное, а вовсе не сверхъестественное воздействие на нашу повседневную жизнь. Так, в конце XIX века было обнаружено, что число солнечных пятен коррелирует с частотой полярных сияний и геомагнитных возмущений. Но только начало внеатмосферных наблюдений во второй половине XX века позволило отождествить солнечные пятна с рентгеновскими активными областями – местом формирования солнечных вспышек и корональных выбросов массы.

Пожалуй, именно вспышки и выбросы оказывают наибольшее внешнее воздействие на Землю, и потому подвергаются столь пристальному вниманию. Во время солнечных вспышек происходит ускорение заряженных частиц до околосветовых скоростей,

достигающих орбиты Земли за пару часов и представляющих опасность для работы космических аппаратов и здоровья космонавтов. Ускорение частиц сопровождается также мощными импульсами рентгеновского и жесткого ультрафиолетового излучения, приводящего к ионизации, нагреву и расширению верхней атмосферы Земли.

Солнечным вспышкам часто сопутствуют выбросы вещества, исторгаемого Солнцем с огромными скоростями – до нескольких миллионов километров в час. Если на пути такого выброса оказывается Земля, ее магнитное поле буквально сметается потоком солнечной плазмы, ну а мы становимся свидетелями магнитных бурь и красочных полярных сияний. Одновременно были осознаны и другие аспекты солнечно-земных связей, например, существование потоков быстрого и медленного солнечного ветра, структура которых определяется магнитным полем Солнца, и которые также воздействуют на магнитосферу Земли.

Поэтому в настоящее время солнечный цикл характеризуется уже далеко не только числами Вольфа, но и широким набором иных параметров, хорошо коррелирующих друг с другом. В первую очередь это, конечно, суммарное по абсолютной величине магнитное поле Солнца, отражающее саму природу 11-летнего цикла. Регистрируется также и изменение полной светимости Солнца, пускай и очень малое по своей относительной величине. (Не смотря на то, что часть солнечной поверхности затеняется пятнами, они всегда окружены участками более яркого, чем обычно, вещества, разогреваемого излишками энергии, которые так или иначе прорываются из глубин Солнца. Поэтому в максимуме цикла светимость Солнца все же немного возрастает.)

Гораздо более существенно меняется яркость Солнца при наблюдении в рентгене и крайнем ультрафиолете из-за наличия большого числа активных областей вблизи максимума цикла, тогда как в минимуме они практически отсутствуют. Активные области также интенсивно излучают в радиодиапазоне, благодаря чему ход солнечного цикла хорошо прослеживается при помощи наземных радиотелескопов. (По историческим причинам, связанным с работой первых радиолокаторов, чаще всего измеряется поток излучения на длине волны 10.7 см.) Помимо этого, вместе с числом и размером активных областей меняется частота и сила солнечных вспышек, также регистрируемых по быстрым изменениям рентгеновского излучения Солнца. Меняется и средняя широта появления солнечных пятен, к концу цикла постепенно смещающихся к экватору.

Разумеется, ход солнечного цикла сказывается и на частоте выбросов массы, а также связанных с ними возмущений магнитного поля Земли. Последние фиксируются при помощи целого набора геомагнитных индексов, в первую очередь Kp, Ap, aa, Dst и AE, отражающих различные процессы в земной магнитосфере. Наконец, в максимуме цикла более интенсивные потоки солнечного ветра лучше экранируют внутренние области солнечной системы от потоков галактических космических лучей, что также регистрируется приборами на Земле.

Кстати, именно последнее обстоятельство позволило ученым проследить историю солнечной активности в глубь веков. Космические лучи при столкновении с частицами атмосферы образуют радиоактивные изотопы, которые впоследствии либо напластовываются в донных отложениях и ледяных кернах, либо накапливаются в кольцах деревьев. Как правило, регистрируются изотопы

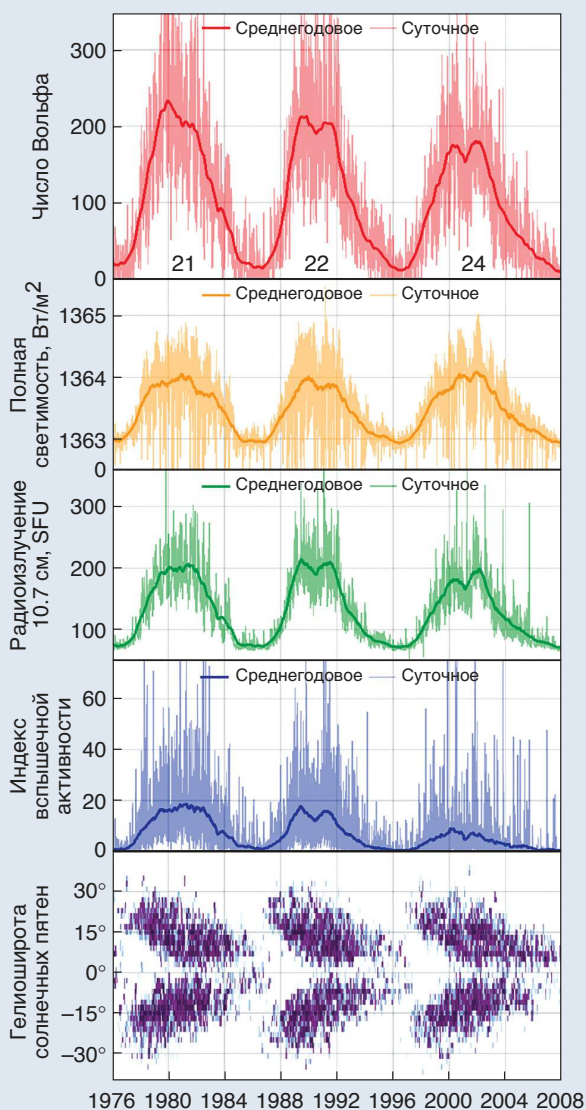


Рис. 8. Различные проявления цикла активности Солнца: в числе солнечных пятен, определяемом числом Вольфа, в его полной светимости, в потоке радиоизлучения, в числе и интенсивности солнечных вспышек, описываемых индексом вспышечной активности, а также в положении солнечных пятен на диске (так называемые «бабочки Маундера»). Изображение авторское, данные взяты из открытых источников

^{14}C и ^{10}Be , образующиеся при взаимодействии космических лучей с ядрами атомов ^{14}N и ^{16}O . Наилучшей точностью обладает радиоуглеродный метод, хорошо разработанный для нужд

археологии и дендрохронологии, однако он ограничен сравнительно коротким периодом полураспада ^{14}C . Несколько дальше – на несколько тысяч лет назад – позволяет заглянуть изотоп

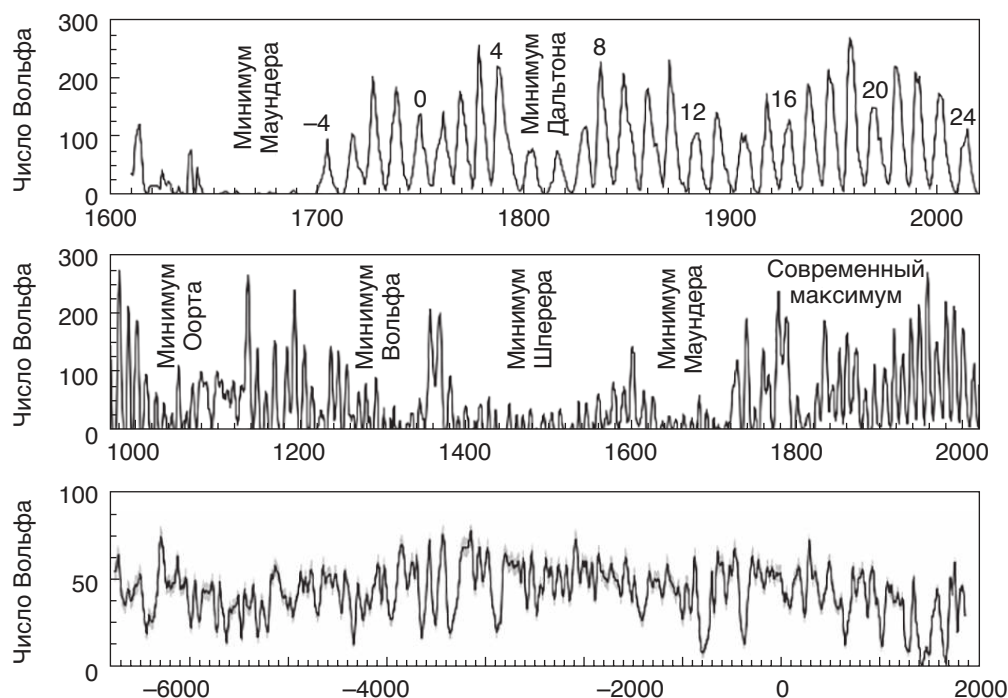


Рис. 9. Солнечная активность сквозь века и тысячелетия: прямые наблюдения чисел Вольфа и их реконструкция по историческим записям (сверху), а также восстановленные значения с помощью радиоуглеродного метода (центр) и по измерениям концентрации ^{10}Be в ледяных ядрах (снизу, среднедекадное, серым показана ошибка измерений). Изображение авторское, скомпилировано по рисунку из различных работ, в первую очередь А. Biswas et al. «Long-Term Modulation of Solar Cycles», <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00968-w>, и приведенным в них ссылкам

^{10}Be из ледяных ядер Антарктиды, однако из-за меньшей точности метода отдельные циклы начинают сливаться, позволяя восстановить лишь средний уровень солнечной активности.

Таким образом, из некогда астрономической диковинки наблюдение солнечного цикла превратилось в важный аспект современной жизни – ведь именно от солнечной активности в значительной мере зависит работа средств связи и космических аппаратов. В СМИ, впрочем, в основном муссируется другой ее аспект – так называемая метеочувствительность, свойственная, по собственному убеждению, некоторым людям. Остается, правда, неясным, как столь слабые изменения магнит-

ного поля – в миллионы раз более слабые, чем, к примеру, поле обыкновенного томографа – могут влиять на самочувствие, ведь даже магнитных рецепторов у людей, как известно, нет. Пожалуй, наиболее правдоподобное, физически обоснованное объяснение – это слабые скачки атмосферного давления, сопровождающие нагрев атмосферы во время солнечных вспышек и геомагнитных возмущений.

ГАДАНИЯ НА КОФЕЙНОЙ ГУЩЕ

С осознанием роли солнечной активности в нашей жизни пришло и вполне естественное желание ее прогнозировать.

вать – если не отдельные вспышки, точное время и сила которых пока, к сожалению, слабо поддаются предсказанию, то хотя бы ее среднего уровня, который как раз и должен определяться ходом солнечного цикла. Казалось бы, если активность Солнца циклична и повторяется с заданным периодом, то в чем проблема? Бери и считай, хоть на 10 лет вперед, хоть на все 100. Отчасти, конечно, так и делается, например, при планировании дальних космических перелетов: поскольку времена ближайших солнечных минимумов примерно известны, часто стараются подобрать окно запуска вблизи одного из них, чтобы по возможности уменьшить дозы излучения, получаемые чувствительной аппаратурой и космонавтами.

Но дать более точный прогноз оказывается уже совсем не так просто: солнечные циклы хоть и похожи, но каждый немного по-своему. В целом, схожа форма циклов, как правило, асимметричная: максимум обычно смещен ближе к началу цикла, при этом он часто оказывается двугорбым, когда число Вольфа долгое время колеблется вблизи своих наибольших значений. Более тонкие детали, однако, могут существенно различаться. В первую очередь сильно варьирует длина цикла: за историю регулярных наблюдений она составляла от 9 до 13.6 лет, так что 11 лет, о которых обычно говорится – это лишь среднее, наиболее характерное значение. Еще сильнее «прыгает» высота циклов: от 81 до 285 чисел Вольфа, со средним значением около 180.

Но это еще цветочки. Исторические записи и радиоизотопные реконструкции чисел Вольфа показывают, что бывают периоды, когда солнечный цикл и вовсе как будто замирает, либо же проявляется крайне слабо. Наиболее известный из таких периодов – так называемый минимум Маундера вто-

рой половины XVII века. Тогда в течение нескольких десятилетий на Солнце практически не было видно пятен, несмотря на случившийся как раз в то время всплеск интереса к таким наблюдениям. Чуть менее известен более слабый минимум Дальтона в начале XIX века, а также ряд других продолжительных минимумов в поздний средневековый период.

Что приводит к таким внезапным остановкам солнечного пульса, до сих пор неизвестно, но, судя по всему, они не так уж редки и случаются каждые несколько сотен лет. На фоне постепенного снижения среднего уровня активности после череды высоких циклов в середине XX века – так называемого современного максимума – ученые все больше задаются вопросом, а не приближаемся ли мы к очередному глобальному минимуму? И действительно, предыдущий 24-й цикл 2008–2019 гг. был одним из самых слабых за всю историю систематических наблюдений. Особенно интересны эти обсуждения в контексте изменения климата Земли: случайно или нет, но предыдущая череда продолжительных минимумов как раз совпала с существенным похолоданием, так называемым малым ледниковым периодом, хотя вклад именно солнечной активности в него остается дискуссионным.

Причина столь большой вариативности солнечного цикла, по всей видимости, кроется в хаотических движениях вещества в конвективной зоне Солнца. Обусловленный этим стохастический характер магнитного динамо практически исключает возможность делать хоть сколько-нибудь точные предсказания на несколько циклов вперед, да и прогнозирование ближайшего цикла оказывается не столь уж простой задачей. Из-за разнообразия методов, ни один из которых, впрочем, не имеет решающего преимущества, оно порой

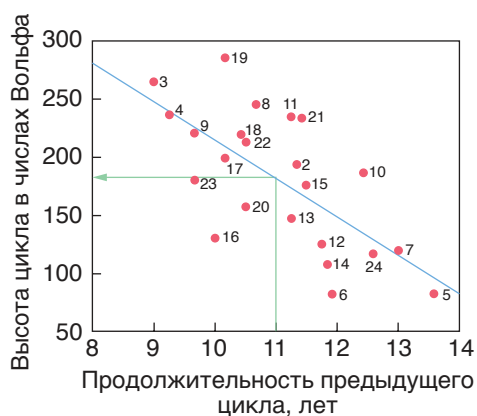
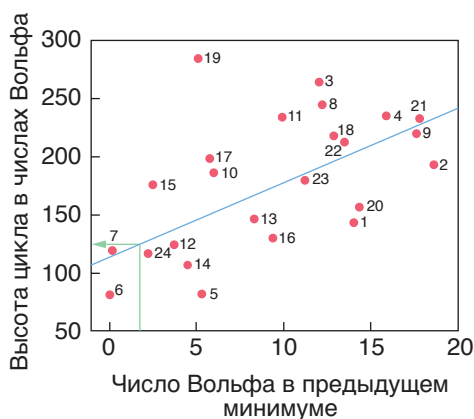
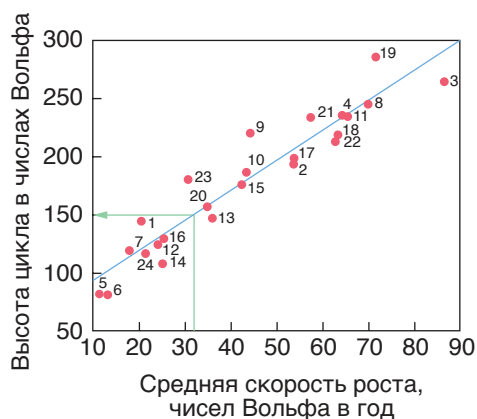


Рис. 10. Основные закономерности в характеристиках солнечных циклов по ряду чисел Вольфа (синий – линейная аппроксимация, зеленый – прогноз для 25-го цикла). Изображение авторское, данные взяты из открытых источников

начинает напоминать своего рода соревнование, а то и вовсе азартный вид спорта, с участием ученых со всего мира. Попробуем все же разобраться в некоторых из этих методов и оценить их эффективность на примере текущего цикла.

Разумеется, первое, что приходит в голову – попробовать найти закономерности в самом ряде чисел Вольфа, благо, данных накоплено уже немало. В самом деле, если посмотреть на историю наблюдений за последние 300 лет, то как будто прослеживаются более крупные, вековые циклы, модулирующие высоту циклов 11-летних. В таком случае можно ожидать, что следующая пара циклов также будут не очень высокими, но к середине столетия солнеч-

ная активность вновь достигнет максимальных значений. Впрочем, при ближайшем рассмотрении этот 100-летний цикл оказывается не столь уж строгим, а на более длительных отрезках времени и вовсе не наблюдается. Недаром все попытки выделить в ряде чисел Вольфа какие-то периоды, чтобы потом продолжить его в будущее, пока что терпели полный крах – видимо, слишком велика здесь доля случайности.

СТАТИСТИКА – ЛОЖНЫЙ ДРУГ ЧЕЛОВЕКА

Если последовательность солнечных циклов действительно более случайна, чем закономерна, более оправ-

данным может оказаться статистический подход. Например, можно искать корреляции между различными характеристиками уже наблюдавшихся циклов, либо же между параметрами соседних, ведь каждый новый цикл рождается из предыдущего, а значит все же должен нести на себе какой-то его отпечаток. Такие корреляции действительно находятся, и долгое время они были одними из лучших способов предсказать если не ход, то хотя бы силу следующего цикла.

Наиболее выраженная зависимость – так называемый эффект Вадлмайера – обнаруживается между скоростью роста числа пятен в начале цикла и его итоговой высотой, что, в общем-то, интуитивно понятно: более мощный цикл и стартует достаточно резво. Несколько более слабую корреляцию с высотой цикла показывает продолжительность предыдущего цикла, а также число Вольфа в предшествующем ему минимуме активности. В применении к текущему циклу указанные методы дают прогноз высоты цикла около 150 чисел Вольфа, однако с немалым разбросом: от 130 до 180.

Есть также любопытная эмпирическая закономерность, обнаруженная в середине прошлого века советскими астрономами Мстиславом Николаевичем Гневышевым и Александром Ивановичем Олем, и носящая ныне их имена. Формулируется она немного замысловато: оказывается, что суммарное за цикл число Вольфа в каждом четном цикле хорошо коррелирует с суммарным числом в следующем, нечетном. В обратную сторону, впрочем, это правило почему-то не работает. К счастью, мы как раз переходим от четного цикла к нечетному: для текущего цикла правило Гневышева–Оля дает прогноз около 140 чисел Вольфа.

Однако число солнечных пятен – лишь одно из внешних, наиболее поверхностных проявлений солнечной активности. Почему бы не попробовать заглянуть в самое сердце 11-летнего цикла – собственно магнитное поле Солнца. И действительно, один из наиболее точных в настоящее время методов прогнозирования основан на измерении силы магнитного поля на солнечных полюсах во время предшествующего минимума активности, ведь именно полярное поле является той начальной закваской, из которой нарождается все последующее поле нового цикла (рис. 11). В приложении к 25-му солнечному циклу этот метод обещает высоту в районе 120 чисел Вольфа.

Заглянуть на полюса Солнца, правда, оказывается не так уж просто, да и систематически магнитное поле Солнца наблюдается сравнительно недавно, всего на протяжении нескольких последних циклов, что не позволяет набрать достаточную для более уверенного прогнозирования статистику. Вот здесь и приходит на помощь другой метод, предложенный все тем же А.И. Олем. Удивительно, но крайне хорошую корреляцию с силой последующего солнечного цикла показывают не только параметры, наблюдаемые на Солнце, но и регистрируемые прямо здесь, на Земле.

Наиболее удобным из них оказывается геомагнитный индекс aa, измеряемый уже более 150 лет, со второй половины XIX века. Эта связь, впрочем, не столь уж таинственна: в минимуме цикла геомагнитные возмущения в основном вызываются потоками быстрого солнечного ветра, интенсивность которых, в свою очередь, связана с величиной полярного поля Солнца. Так, если отфильтровать из общего ряда возмущения, которые связаны со

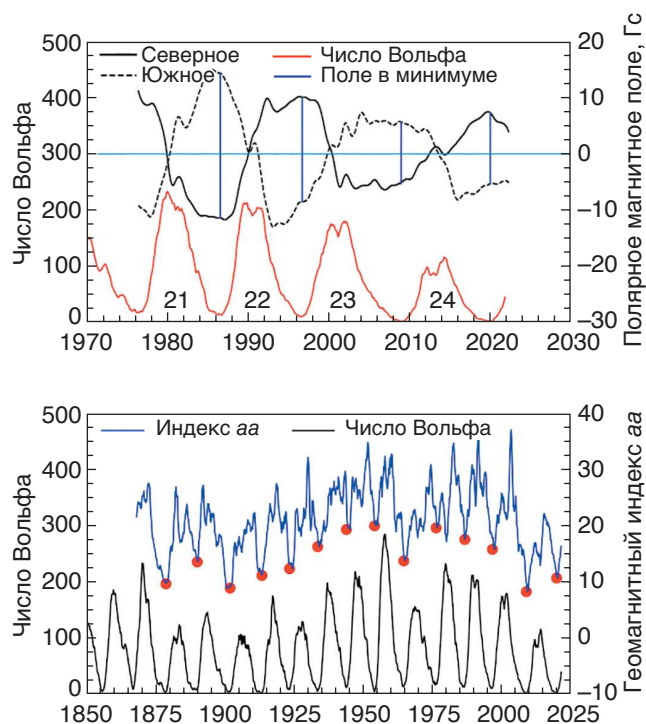


Рис. 11. Прогнозирование силы солнечного цикла по величине полярного магнитного поля Солнца (сверху) и геомагнитного индекса aa (снизу) в предшествующем минимуме активности. Адаптированное изображение с сайта <https://www.solarcyclescience.com/forecasts.html>

вспышками (за неимением лучшего их можно выделить хотя бы по числу солнечных пятен), прогностическая точность метода существенно возрастает: для текущего цикла метод А.И. Оля дает около 130 чисел Вольфа.

Разумеется, применяется и множество иных методов прогнозирования, основанных на поиске других, так или иначе связанных с солнечной активностью параметров. Так что недостатка способов предсказания цикла нет – скорее наоборот, проблема в том, что их становится слишком много. Получается, что для каждого нового цикла можно подобрать такой параметр, который будет давать наилучший результат именно для него, тогда как для сле-

дующего может «выстрелить» какой-то другой. Тут шутку играет с нами обычно слишком малая статистика наблюдений, для многих величин, покрывающая всего несколько циклов, а новых данных, увы, приходится ждать десятилетиями.

К тому же, все описанные выше методы позволяют спрогнозировать высоту цикла фактически только уже в его начале, когда становится ясно, что предшествующий ему минимум активности пройден. Это ограничивает дальность прогноза всего несколькими годами, что, конечно, не может не удручать. Один из наиболее действенных способов обойти это ограничение – попробовать проследить за перемещением магнитных концентраций с тем, чтобы рассчитать силу будущего полярного поля в конце текущего цикла. Однако такой под-

ход сопряжен со значительными вычислительными сложностями и требует не всегда оправданных предположений о характере движения солнечного вещества.

ЧТО ЦИКЛ ГРЯДУЩИЙ НАМ ГОТОВИТ?

Если уж совсем начать фантазировать, наиболее полный и точный прогноз можно было бы получить, полностью просчитав динамику вещества и магнитного поля в конвективном слое Солнца. Но эта задача, требующая огромных вычислительных мощ-

ностей, непосильна даже для наиболее мощных современных суперкомпьютеров, и, к тому же, требует детальной информации о начальном состоянии конвективного слоя, чего не могут дать и самые продвинутые методы геблиосейсмологии.

Поэтому в последнее время начинают широко применяться так называемые методы стохастического моделирования, существенно упрощающие поведение внешней оболочки Солнца вплоть до чисто абстрактной, низкоразмерной системы, описываемой сложным набором стохастических, т. е. ведущих себя непредсказуемым образом уравнений. Идея состоит в том, что если удастся подобрать параметры системы так, что она будет хорошо воспроизводить уже имеющийся ряд числовых данных, то и результаты последующих вычислений могут дать хороший прогноз будущей солнечной активности. В настоящее время такие методы прогнозирования находятся еще в зачаточной стадии развития и не дают достаточной точности, однако являются, пожалуй, наиболее многообещающими – по крайней мере, им точно есть, куда расти.

Разумеется, все разнообразие подходов к прогнозированию солнечной активности этим отнюдь не исчерпывается, мы привели лишь наиболее простые и наглядные из них. Так, в 2019 г., перед самым началом текущего, 25-го солнечного цикла, был составлен консенсус-прогноз с участием более чем 50 научных групп со всего мира, использовавших практически все доступные методы прогнозирования. Согласно этому прогнозу, максимум текущего цикла должен быть

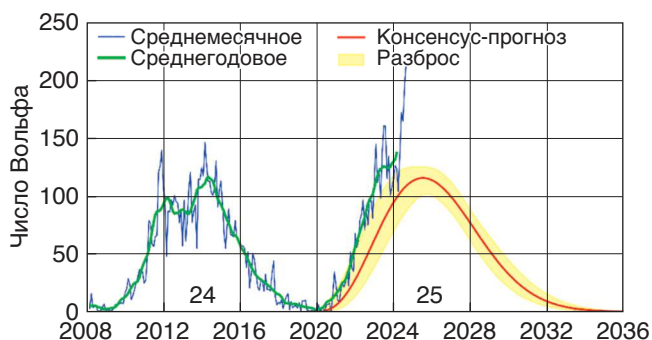


Рис. 12. Консенсус-прогноз 25-го солнечного цикла на фоне последних измерений чисел Вольфа. Изображение авторское, данные взяты из открытых источников

достигнут в июле 2025 г., а его сила составит от 105 до 125 чисел Вольфа. Таким образом, ожидалось, что новый цикл будет относительно слабым, примерно таким же, или чуть более высоким, чем предыдущий 24-й.

Прямо сейчас, однако, среднемесячное число Вольфа уже перевалило за 200, т. е. реальность в который раз значительно превзошла все, даже самые смелые ожидания. Впрочем, мы, скорее всего, уже практически достигли максимума цикла, и число пятен, а в месте с ними и активность Солнца, уже вряд ли вырастут еще больше. Тем не менее можно с уверенностью утверждать, что текущий солнечный цикл уже будет заметно более высоким, чем предыдущий, а значит и общая активность Солнца пошла на рост. Видимо, могучий пульс нашего светила пока и не думает останавливаться, а значит и новый ледниковый период, по крайней мере в ближайшее время, нам уже не грозит.

Литература

1. Эдвард Гибсон Спокойное Солнце. М.: Мир, 1977.
2. Язев С.А. Лекции о Солнце. М.: АСТ, 2018.
3. Киричек Е.А., Панченко И.Е. Неизвестное Солнце. Чудеса. Факты. Загадки. М.: АЙАР, 2022.

СОЛНЦЕ И ЧЕЛОВЕК: СОХРАНЯЮТСЯ ЛИ СТАРЫЕ СВЯЗИ В XXI ВЕКЕ?



ЗЕНЧЕНКО Татьяна Александровна,

доктор биологических наук, кандидат физико-математических наук

Институт космических исследований РАН

Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН



DOI: 10.7868/50044394824060069

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Принята к публикации: 15.09.2024

Во второй половине XX – начале XXI в. получены впечатляющие результаты исследований в области гелиобиологии, анализирующие проявления эффектов космической погоды в динамике различных заболеваний: психических, аутоиммунных, инфекционных, сердечно-сосудистых¹. В статье приведены примеры, показывающие, что, несмотря на кардинальное изменение условий окружающей среды, влияние солнечной ритмики по-прежнему обнаруживается в динамике многих современных медико-биологических и социально-психологических процессов, что сохраняет актуальность

исследования природы и механизмов солнечно-биосферных связей.

В своей книге «Земное эхо солнечных бурь» А.Л. Чижевский, родоначальник гелиобиологии, приводит графики годовых значений смертности от дифтерии в разных странах Западной Европы за 50 лет в сопоставлении с ходом солнечной активности (СА, у Чижевского – «солнцедетельности»)². Ученый заметил, что на протяжении 35 лет количество случаев смерти практически повторяет 11-летнюю периодичность хода числа солнечных пятен, но в какой-то момент (1894 г.) эти колебания исчезают, потому что был открыт способ лечения этой болезни. Этот пример показывает, что эволюционно

¹ Бреус Т.К. Влияние «космической погоды» на биологические объекты // Земля и Вселенная. 2009. № 3. С. 53–61.

² Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. С. 192.

обусловленные, наблюдавшиеся на протяжении многих веков связи между ритмикой Солнца и земными процессами могут разрушаться в результате определенных социальных изменений.

За прошедшие сто лет мир изменился кардинально. В XIX в. большая часть жителей Земли жила при свечах и лучинах, по немногочисленным железным дорогам дымили паровозы, а на улицах крупных городов появлялись первые автомобили. В наше время стены любого помещения прошиты, словно нервами, электрическими проводами, нас окружают компьютеры, вездесущая мобильная связь, бесконечно размножившиеся бытовые электроприборы, а также электромобили, электровозы и т. д.

С другой стороны, те инфекционные заболевания, в динамике которых А.Л. Чижевский обнаруживал проявление 11-летней солнечной ритмики, таких как дифтерия, чума, менингит, брюшной тиф, малярия и т. д., в наше время если и сохранились, то перестали носить характер эпидемий. С тех пор были открыты и широко внедрены вакцины и антибиотики, позволяющие купировать вторичные осложнения вирусных заболеваний, а представления о гигиене кардинально изменились.

Возникает закономерный вопрос: а может быть, все те эффекты СА, которые наблюдались сто и более лет назад, в XXI в. прекратились, как прекратилась в Европе в 1894 г. 11-летняя ритмика смертности от дифтерии? Цель данной работы заключалась в том, чтобы рассмотреть процессы, на которые в свое время обратили внимание

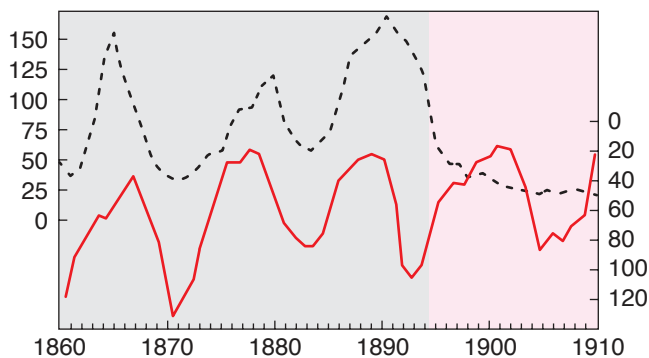


Рис. 1. График заболеваний дифтерией в Дании с 1860 по 1911 г. и солнечная активность («солнцедетельность»). Верхняя кривая показывает уровень смертности от дифтерии в городах Дании, нижняя – солнечная активность в перевернутом виде (зеркально). Введение серотерапии отмечено в розовом секторе (с 1894 г.). По оси абсцисс – годы, левая ось ординат – число умерших, правая ось ординат – числа Вольфа (количество солнечных пятен)

А.Л. Чижевский и его коллеги-современники, и проверить, обнаруживаются ли аналогичные закономерности на данных конца XX – начала XXI в. уже с точки зрения современных, сильно ужесточившихся требований к сбору материала и анализу данных.

ЧИЖЕВСКИЙ И ЕГО ВРЕМЯ

В 1924 г. в Калуге вышла книга А.Л. Чижевского «Физические факторы исторического процесса», а в 1930 г. в Москве – «Эпидемические катастрофы и периодическая деятельность Солнца». Первая работа потом долгое время была запрещена, а результаты второй ученый повторно изложил в книге «Земное эхо солнечных бурь». Фактически в своих исследованиях по гелиобиологии (были и другие направления в его работе) он рассматривал два основных вида биосферных процессов: эпидемии и революции. А.Л. Чижевский считал, что причиной такого «тяготения» эпидемий к экстремумам СА является

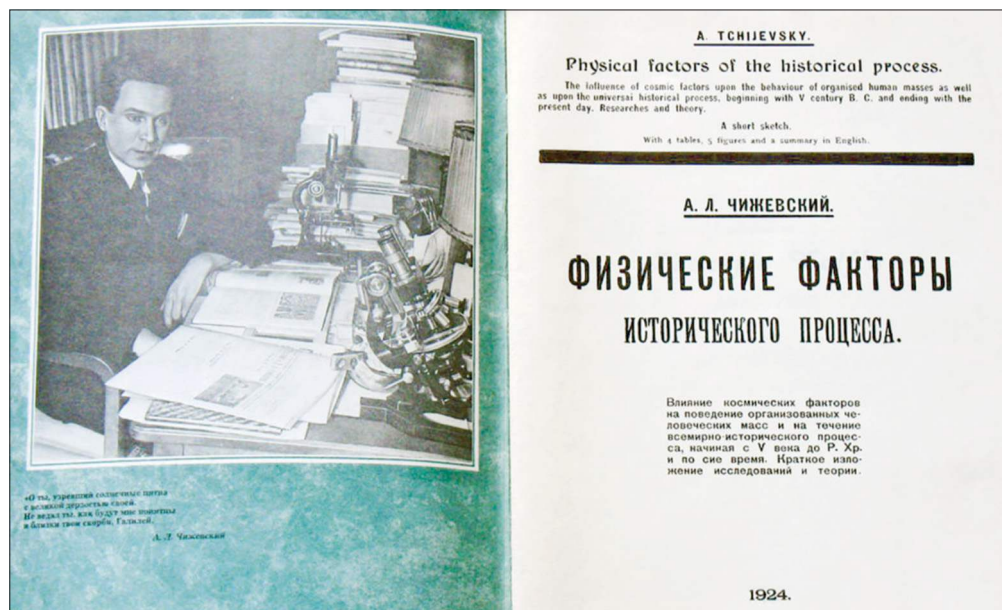


Рис. 2. Фронтиспис книги А.Л. Чижевского «Физические факторы исторического процесса». Калуга, 1924 г.

изменчивое влияние неизвестного солнечного агента на активность и болезнетворность бактерий и вирусов. В то же время, по его гипотезе, революции и массовые беспорядки происходят преимущественно вблизи максимумов СА, потому что активное Солнце возбуждающим образом влияет на психику сразу большого количества людей.

Как пишет кандидат физико-математических наук В.Н. Ишков³, в те времена о факторах космической погоды⁴ и их динамике было известно следующее: «Первая эпоха пониженной СА длилась с 1878 по 1933 г. (5 солнечных циклов (СЦ))⁵, но в то время

наблюдательные данные о Солнце ограничивались наблюдениями пятен, числом и площадями групп солнечных пятен, состоянием и вариациями геомагнитного поля: величиной возмущения геомагнитного поля (аа-индекс) по двум разнесенным по полушариям среднеширотным геомагнитным обсерваториям, осуществляющим непрерывную запись состояния магнитного поля Земли. По этим непрерывным данным легко выделялись внезапные кратковременные возрастания геомагнитного поля – внезапные начала, отражающие, в современном понимании, приход в околоземное космическое пространство межпланетных ударных волн. Кроме того, по записям вариаций геомагнитного поля можно выделить и, так называемые, “кроше”, (фр. *crochet* – крючок) появляющиеся в момент облучения ионосферы Земли в максимуме достаточно мощной солнечной вспышки. По этим наблюдениям можно оценить ход развития

³ Ишков В.Н. Итоги и уроки 24 цикла – первого цикла второй эпохи пониженной солнечной активности // *Астрономический журнал*. 2022. Т. 99, № 1. С. 54–69.

⁴ Климов С.И., Родин В.Г., Григорян О.Р. Излучение и контроль «космической погоды» // *Земля и Вселенная*. 2000. № 3. С. 9–18.

⁵ Ишков В.Н. Двадцать третий цикл солнечной активности // *Земля и Вселенная*. 2001. № 2. С. 3–12.

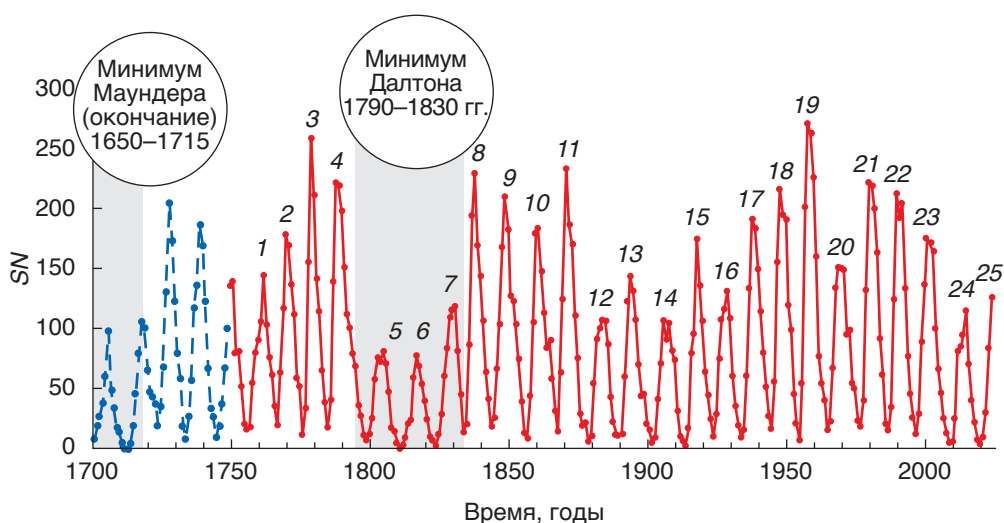


Рис. 3. Циклы солнечной активности (ход среднегодовых значений числа солнечных пятен) за период с 1700 по 2023 г. Красный — результаты наблюдений, синий — ретроспективного восстановления. Указаны номера циклов и интервалы долгосрочных минимумов.

По материалам Мирового Центра данных по солнечно-земной физике:
<http://www.wdcb.ru/stp/data.ru.html>

и, в некотором приближении, характер вспышечной активности и ее геоэффективность в первую эпоху «пониженной» СА. Только с началом космической эры (СЦ19, начало 60-х годов 20 века) наблюдения Солнца и его влияния на околоземное пространство становятся регулярными и все более полными».

Своей главной задачей А.Л. Чижевский считал доказательство влияния на земные процессы именно космической, солнечной ритмики. Поэтому он стремился, во-первых, получить максимально доступные по объему (географии и времени) массивы данных, а они в то время могли быть только в годовом разрешении, во-вторых, считал правильным сопоставлять эти данные не с потенциальными промежуточными звеньями, вроде климатических процессов или даже геомагнитной активности, а с «первоисточником», т. е. «солнцедельностью» нашего светила.

С тех пор постановка задачи кардинально изменилась. Последователи идей Александра Леонидовича в течение XX в. нашли очень большое количество подтверждений, что СА оказывается модулирующим агентом для самых разных периодических процессов в биосфере. В результате главную цель основателя гелиобиологии можно считать достигнутой. И, как логическое ее развитие и продолжение, встали другие вопросы: какой механизм (или механизмы) обеспечивает передачу солнечного влияния на Землю, кто или что в биосфере является первичным реципиентом этого влияния?

В ходе 11-летнего цикла СА вариации собственно солнечной постоянной составляют менее 0.1% и почти незаметны в диапазоне оптического излучения. Однако в диапазоне мягкого рентгеновского излучения Солнце ведет себя как переменная звезда — разница уровня фонового излучения в стандартном диапазоне 0.1–0.8 нм

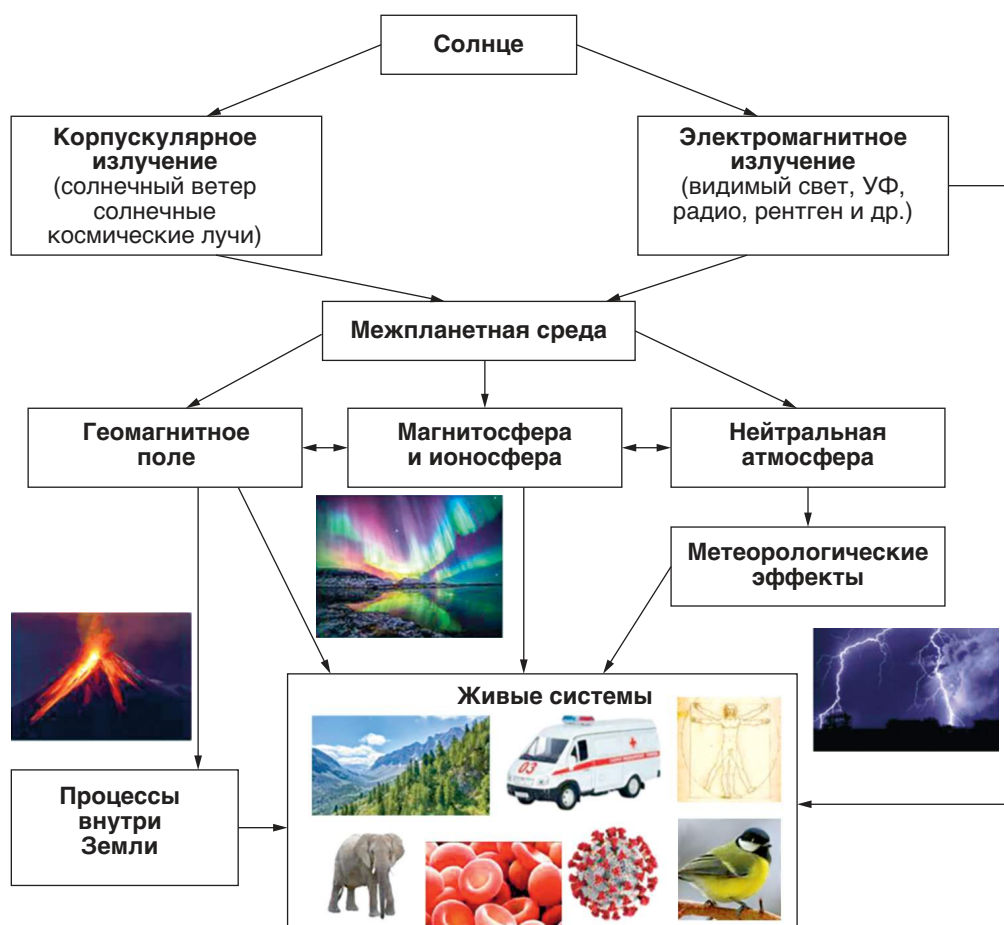


Рис. 4. Система солнечно-биосферных связей. По материалам: Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофизические процессы и биосфера, 2009. Т. 8, № 1. С. 5–35

(1–12.5 кэВ) в максимуме и в минимуме СА превышает 2 порядка, а в диапазоне радиоизлучения фоновые значения на стандартной длине волны 2800 МГц (10.7 см) могут изменяться в три раза.

Однако для решения новой задачи традиционные масштабы разрешения данных (годовой и месячный) уже не подходили: на таких данных было технически невозможно различить динамику собственно числа солнечных пятен SN и, например, интегрального числа солнечных вспышек, интенсив-

ности потоков рентгеновского и радиоизлучения, солнечных и галактических космических частиц, поскольку их фазы практически совпадают. Отчасти можно отличить динамику геомагнитной активности, но не настолько, чтобы надежно установить канал передачи на Землю солнечной ритмики.

Постепенно в гелиобиологических исследованиях XX в. была увеличена частота дискретизации данных: самыми популярными стали исследования временных рядов в суточном разрешении. Одновременно, по мере их

Рис. 5. На изображении Солнца в мягком рентгеновском диапазоне (193 Å) можно увидеть на фотосфере яркие области с сильной магнитной активностью. Снимок получен 19 ноября 2024 г. космической обсерваторией Solar Dynamics Observatory. NASA

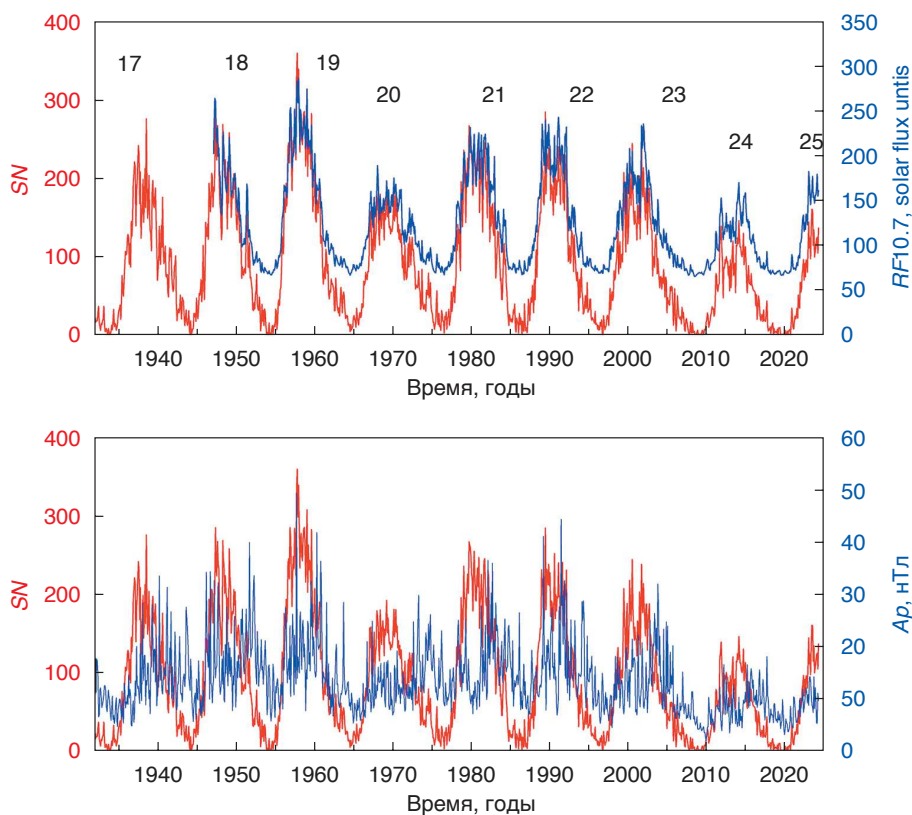
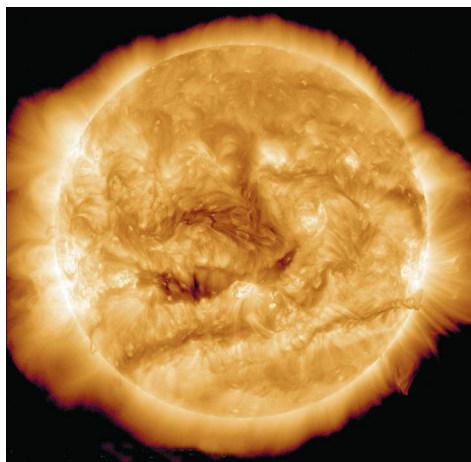


Рис. 6. Ход среднемесячных значений числа солнечных пятен в 1932–2023 гг. (красная кривая на верхнем и нижнем графиках; сверху даны номера солнечных циклов) и синхронные ему ряды значений интенсивности радиоизлучения Солнца на волне 10.7 см (синяя кривая) на верхнем графике. На нижнем графике синяя кривая соответствует значениям A_p -индекса (в нТл), который отражает средний уровень геомагнитной активности. SN – числа Вольфа (количество солнечных пятен). По материалам Мирового Центра данных по солнечно-земной физике: <http://www.wdcb.ru/stp/data.ru.html>

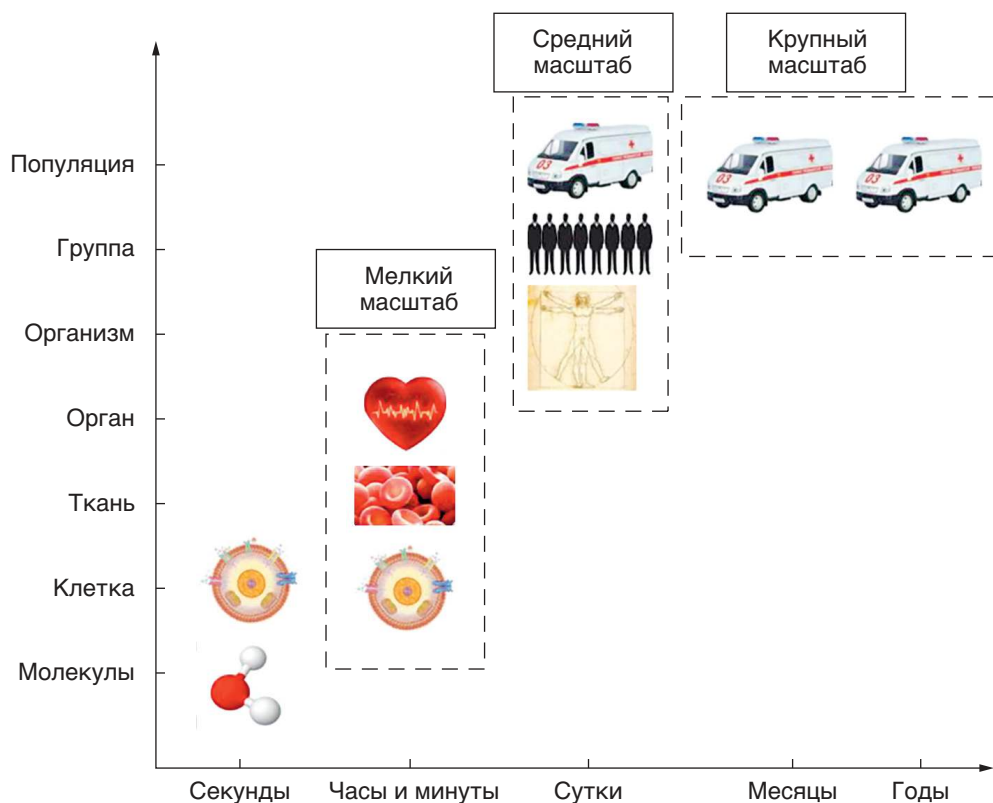


Рис. 7. Схема соотношения временных масштабов и уровней изучаемых объектов в гелиобиологии. Крупный масштаб (годы и месяцы) – показатели заболеваемости населения; средний (сутки) – обострения заболеваний больших и малых групп, отдельных людей, функциональное состояние систем организма; мелкий (часы и меньше) – функциональное состояние органов, тканей, клеток, органелл и т. д.

открытия, включались в рассмотрение такие факторы, как параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, геомагнитных пульсаций, интенсивности нейтронных потоков и т. д. С биологической стороны основное внимание стали отдавать не медленным популяционным процессам, а реакции отдельных организмов или систем организма человека и животных: сердечно-сосудистой, центральной и вегетативной нервной, эндокринной, системе крови и т. д.

При этом закономерности проявления космической погоды, обнаруженные на одном масштабе времени, нель-

зя автоматически распространять на другой. Поэтому при анализе и интерпретации гелиобиологических результатов нужно обращать внимание, в каком временном масштабе данные они были получены. Ниже будут рассмотрены два масштаба, которые использовались во времена А.Л. Чижевского. Первый – «крупный» масштаб, годовые или месячные ряды параметров космической погоды, для которых возможно сопоставление только с популяционными данными медицинской статистики; второй – «средний», суточный масштаб. В настоящее время существуют исследования, в которых используется еще

и «мелкий» масштаб, внутрисуточный, но сто лет назад он не использовался, поэтому он не был включен в сравнение.

Однако данная статья не является обзором в том смысле, что она не имеет цели упомянуть все работы в той или иной области гелиобиологии или по определенному вопросу. Далее приводятся просто отдельные примеры исследований, позволяющие получить ответ на заданный выше вопрос: сохраняются ли в настоящее время хотя бы некоторые солнечно-биосферные связи, обнаруженные сто лет назад А.Л. Чижевским и его современниками.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ГОДОВОМ И МЕСЯЧНОМ МАСШТАБЕ ДАННЫХ

В современной физике существует распространенное мнение, что любое физическое явление для надежного утверждения о его существовании должно быть воспроизведено в лаборатории. С этим утверждением трудно спорить, но применительно к системе солнечно-биосферных связей, как и в целом к исследованию космоса, оно не работает. Взаимосвязь процессов такого пространственного и временного масштаба никогда не получится воспроизвести в лаборатории, поскольку такая лаборатория уже существует в единственном экземпляре, и человечество в ней – не экспериментатор, а часть наблюдаемого объекта. Поэтому натурные наблюдения и их последующий анализ пока остаются единственным методом исследования этих процессов, как и во времена А.Л. Чижевского.

Эпидемии

Есть основания надеяться, что подавляющее большинство инфекционных болезней, об эпидемиях которых

писал А.Л. Чижевский, осталось в прошлом. Однако всего два года назад ушла с первой полосы мировых новостей пандемия Covid-19. Скорее всего, анализ ее логичности или, наоборот, парадоксальности относительно долговременной солнечной ритмики еще впереди, поскольку прошло слишком мало времени. Однако отмечается, что начало взрывного распространения Covid-19 пришлось на момент самого глубокого за сто лет минимума СА ($W^*_{\min} = 1.3$, в новой редакции 1.8), что является рекордом для всех достоверных СЦ и последовало сразу за сверхсильным всплеском космических лучей в декабре 2019 г.⁶

Динамика потока галактических космических лучей (ГКЛ) так же имеет 11-летнюю периодичность, только в противофазе с СА, поскольку сильный солнечный ветер «сдувает» частицы ГКЛ, и они в меньшем количестве достигают околоземного пространства, а порожденные ими нейтронные потоки – земной поверхности. Возможному ионизирующему действию нейтронной компоненты ГКЛ приписывают обнаруженные значительные изменения в показателях смертности от различных заболеваний в разные годы в Сан-Паулу (Бразилия) в 1951–2012 гг. (т. е. за период практически в шесть СЦ проанализировано около 53 тыс. случаев)⁷. Авторы пишут, что интенсивность потока космических лучей значительно коррелирует с динамикой общей смертности, а также смертности от инфекционных заболеваний, материнской

⁶ Wickramasinghe N.C. Is the 2019 novel coronavirus related to a spike of cosmic rays? Adv. Genet., 2020. Vol. 106. P. 119–122.

⁷ Vieira C.L.Z., Janot-Pacheco E., Lage C., Pacini A., Koutrakis P., Cury P.R., Shaodan H., Pereiral L.A., Saldiva P.H. Long-term association between the intensity of cosmic rays and mortality rates in the city of Sao Paulo Environ // Res. Lett., 2018. 13. 024009.



Рис. 8. Графики 1958–2024 гг. корреляции (с обратным знаком) интенсивности потока галактических космических лучей и количества солнечных пятен (SN). В годы высокой солнечной активности поток солнечного ветра «сдувает» потоки ГКЛ в околоземном пространстве, в результате чего нейтронный поток у поверхности Земли, вызванный ГКЛ, становится меньше. Источник: http://magspace.ru/uploads/2015_/10/11/

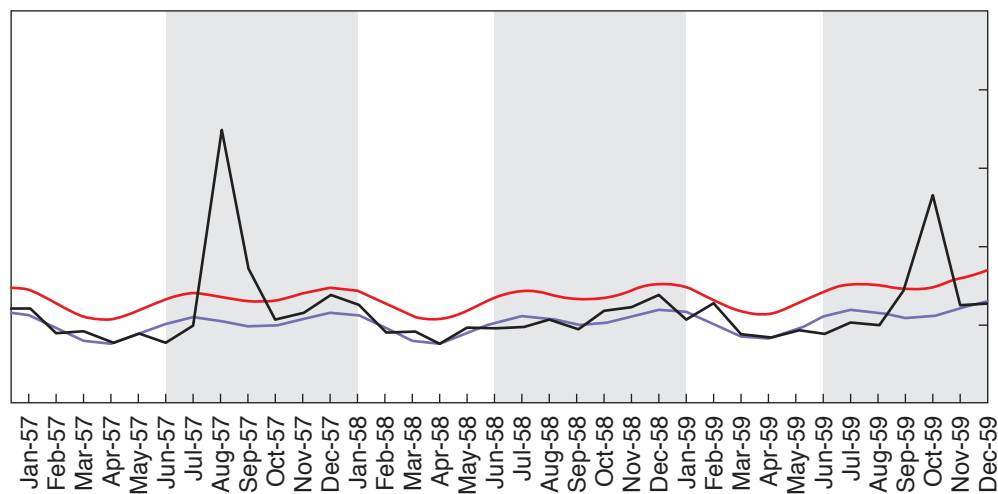


Рис. 9. Уровень смертности в Чили в 1957–1959 гг. в период эпидемии гриппа и максимума солнечной активности. Красная кривая – верхний предел заболеваемости, синий – фоновый уровень. Сезоны гриппа выделены серым цветом. Обратите внимание на черные кривые всплеска смертности. Источник: https://en.wikipedia.org/wiki/1957%E2%80%931958_influenza_pandemic

смертности и перинатальной смертности ($p < 0.001$).

В то же время с человечеством устойчиво остается традиционный ежегодный грипп, сила которого варьирует от года к году, и параметры этой модуляции так же обнаруживают признаки участия солнечной ритмики.

Ежемесячный временной ряд данных о заболеваемости гриппом длительностью в 300 месяцев, отражающий абсолютное число новых случаев заболевания в районе Большого Баку, Азербайджан, за 1976–2000 гг. содержал помимо ожидаемого сильного годового периода еще и периоды 2.5, 6.1 и 11.5 лет соответственно⁸.

Пандемия АН1N1 в 2009 г. стала глобальной проблемой для здравоохранения, хотя, к счастью, ее худшие ожидаемые последствия не были реализованы. Ретроспективный анализ моментов начала сильных эпидемий гриппа показал, что практически все зарегистрированные вспышки гриппа и возможные пандемии произошли в сроки, соответствующие экстремальным значениям солнечных пятен, или ± 1 год в пределах таких экстремальных значений (отношение шансов возникновения в активные/спокойные годы составляет 3.87). В частности, автор этого исследования упоминает о сильных эпидемиях гриппа в 1957 и 1979 гг., моменты которых соответствуют двум последовательным максимумам СА, причем 1957 г. – абсолютный рекорд числа солнечных пятен за все время наблюдений с 1850 г.⁹

УФ-излучение как кандидат на действующий фактор

Как уже было сказано выше, при изучении 11-летней ритмики в различных биосферных процессах мы можем только строить предположения о природе собственно действующего агента. В упомянутых здесь и далее работах, исследующих долгосрочные эффекты СА, большинством авторов в качестве возможного действующего фактора рассматриваются два кандидата: это либо галактические космические лучи, если обнаруженная динамика популяционного процесса идет в противофазе с количеством солнечных пятен, либо ультрафиолетовое (УФ) излучение Солнца, если фазы совпадают.

Достигающее земной поверхности УФ-излучение, хотя и очень ослабленное по сравнению с космическим пространством, все еще остается очень мощным, особенно в периоды максимума СА. Оно составляет около 3% солнечного излучения на уровне земли, из которых около 95% находится в спектре УФ-А (315–400 нм) и около 5% в спектре УФ-В (280–315 нм).

Давно обнаружено, что УФ-излучение может вызвать мутагенные эффекты, и в частности, быть причиной значительных изменений в эпигеноме¹⁰ человека и животных. В некоторых, наиболее высоких по числу солнечных пятен, циклах СА (их называют хаотическими) всплески УФ-излучения достигают очень высоких значений. В течение примерно трех лет около соответствующего максимума СА они могут

⁸ Dimitrov B.D., Babayev E.S. Cyclic variations in the dynamics of flu incidence in Azerbaijan, 1976–2000 // *Epidemiology & Infection*, 2015. Vol. 143 (1). P. 13–22.

⁹ Qu J. Is sunspot activity a factor in influenza pandemics? // *Rev. Med. Virol.* 2016. Sep. Vol. 26 (5). P. 309–313.

¹⁰ Эпигеном – совокупность специфических меток, определяющих активность генов, но не затрагивающих первичную структуру ДНК. Эпигеном представляет собой своеобразный регуляторный слой, расположенный как бы «над» геномом клетки. Условно говоря, эпигеном раздает команды, какие гены должны работать (экспрессироваться), а какие – отдыхать.

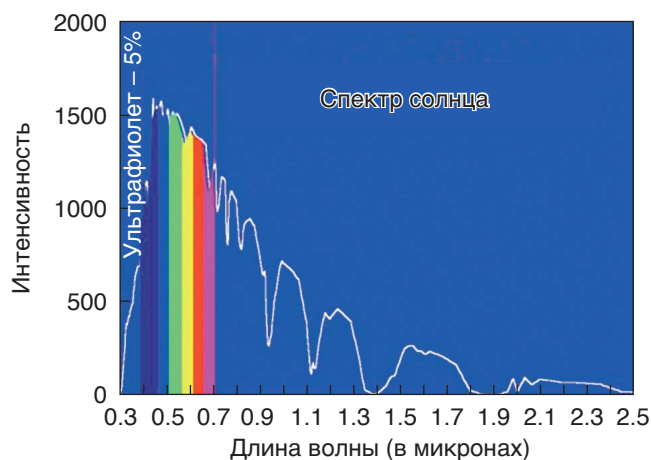


Рис. 10. Графическая иллюстрация интенсивности солнечного излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в зависимости от длины волны в спектре. Максимум интенсивности приходится на ультрафиолет 0.28–0.4 мкм (280–400 нм).
Источник: uvbnb.ru

быть даже более мутагенными, чем в среднем¹¹. Четыре из шести таких циклов пришлось на вторую половину XX столетия (18-й, 19-й, 21-й и 22-й).

Вообще, многолетние ритмы в нарастании и убывании инфекционных эпидемий являются скорее правилом, чем исключением¹². Обычно они объясняются взаимодействием в системе с обратной связью «патоген – человеческая популяция». Пики солнечной радиации, связанные с 10–11-летним СЦ, рассматриваются исследователями как возможная причина необратимых генетических нарушений в результате прямых мутаций и иммунологического стресса. Эта гипотеза имеет серьезные основания, поскольку даже результирующее увеличение УФ-излучения на уровне земли на 1–2% во время максимумов СА является значительным стрессом для механизмов восстановления ДНК организма и, таким образом,

может быть модулятором целого ряда заболеваний и даже влиять на продолжительность жизни.

УФ-излучение и продолжительность жизни

С 1993 г. появилось несколько работ, показывающих, что более интенсивное УФ-излучение в период внутриутробного развития человека неблагоприятно влияет на продолжительность его жизни. В одной из таких работ материалами для анализа послужили записи о смерти примерно 63 млн американцев из Национального центра статистики здравоохранения (NCHS) с 1979 по 2013 г.¹³ При этом авторы предварительно исключили из выборки несчастные случаи, самоубийства и военные потери. Годы рождения варьировали от 1866 до 2013 г. Проводили сравнение продолжительности жизни с уровнем СА (по числу солнечных пятен в старой редакции) в год зачатия человека: годы с $\text{SN} \leq 90$ считались «спокойными», $\text{SN} > 90$ – «активными». Оказалось, что мужчины всех

¹¹ Davis G.E. Jr., Lowell W.E. Chaotic solar cycles modulate the incidence and severity of mental illness // Med. Hypotheses, 2004. Vol. 62 (2). P. 207–214.

¹² Davis G.E. Jr., Lowell W.E. Solar cycles and their relationship to human disease and adaptability // Med. Hypotheses., 2006. Vol. 67 (3). P. 447–461.

¹³ Davis G.E. Jr., Lowell W.E. Solar energy at birth and human lifespan // J. Photochem. Photobiol. B. 2018. Sep. Vol. 186. P. 59–68.

рас, родившиеся в «спокойные» годы, имели среднюю продолжительность жизни 74.4 года, женщины – 78.1; в то время как в «активные» годы мужчины жили в среднем 66.3 года, а женщины – 70.2 года, т. е. разница в продолжительности жизни составила 8.1 года для мужчин и 8.5 года для женщин. Для чернокожих мужчин и женщин соответствующее сокращение продолжительности жизни составило 8.3 и 9.6 года. Получается, что более высокая солнечная энергия при рождении оказала неблагоприятное влияние на продолжительность жизни человека, сократив ее в среднем на 8 лет.

Аутоиммунные и психические заболевания

Еще одним биологическим проявлением действия солнечного УФ-излучения стало обнаруженное его участие в развитии такого аутоиммунного заболевания, как рассеянный склероз (РС). Заболеваемость рассеянным склерозом в мире растет, особенно среди женщин, у которых оно обнаруживается в два-три раза чаще, чем у мужчин. Анализ, аналогичный описанному выше, но для людей с РС (общая выборка случаев 85 202, годы установления диагноза 2007–2021 гг.) показали, что, во-первых, люди белой расы имеют большую чувствительность к УФ-излучению, во-вторых, разница в продолжительности жизни между белыми женщинами и белыми женщинами с РС, родившимися в годы активного солнца (> 80–90 SN) составляет 5.7 лет; наконец, среди родившихся в годы активного солнца примерно вдвое больше людей с РС (27%) чем в среднем по проанализированной популяции (14%). При этом месяц зачатия человека оказывается важнее месяца рождения в объяснении того, как УФ-излучение запускает переменную генетическую предрасположенность к РС. Авторы

предполагают, что если УФ-излучение в период зачатия превышает некоторое пороговое значение, как это происходит в годы высоких максимумов СА или на высоте более 3000 футов (914 м) над уровнем моря, то существующий механизм синтеза витамина D, в целом смягчающий течение РС, подавляется, а генотоксические эффекты более интенсивного УФ-излучения способствуют развитию РС у лиц с генетической предрасположенностью¹⁴.

Очень близкий по смыслу результат был получен для генетически обусловленных психических болезней. Оказалось, что высокая интенсивность УФ-излучения или быстрое его возрастание на ранних сроках беременности являются вероятными эпигенетическими триггерами для таких серьезных психических заболеваний, как биполярное расстройство, а также для шизофрении и шизоаффективного расстройства, причем для первого возможное влияние УФ-излучения оказалось в несколько раз выше, чем для остальных. Кроме того, психическое заболевание обострялось, когда среднее число SN удваивалось¹⁵.

Наряду с заболеваемостью и смертностью населения от болезней, еще одним важным социальным параметром является динамика самоубийств. Уровень самоубийств в Японии является девятым по величине в мире¹⁶.

¹⁴ Davis G.E. Jr., Lowell W.E. Triggering multiple sclerosis at conception and early gestation: The variation in ultraviolet radiation is as important as its intensity // *Heliyon*. 2023. Jun 3. Vol. 9 (6): e16954.

¹⁵ Davis G.E. Jr., Davis M.J., Lowell W.E. The effect of ultraviolet radiation on the incidence and severity of major mental illness using birth month, birth year, and sunspot data // *Heliyon*. 2022. Mar 25. Vol. 8 (3): e09197.

¹⁶ Tada H., Nishimura T., Nakatani E., Matsuda K., Teramukai S., Fukushima M. Association of geomagnetic disturbances and suicides in Japan, 1999–2010 // *Environ Health Prev. Med.* 2014. Jan. Vol. 19 (1). P. 64–71.

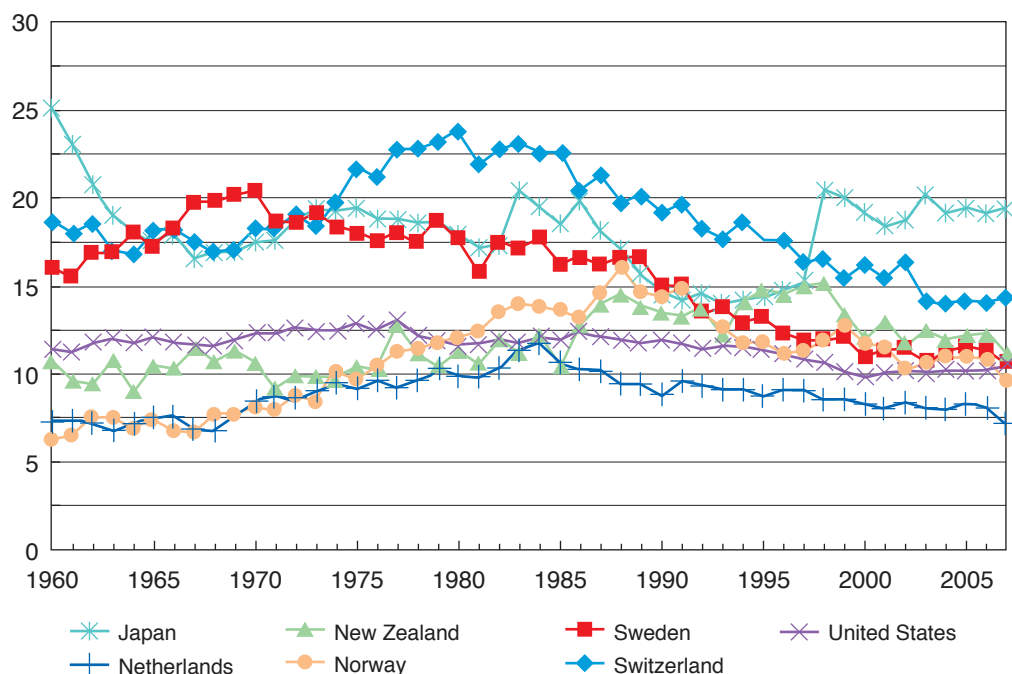


Рис. 11. Число самоубийств с 1960 по 2017 г. в Японии, Голландии, Новой Зеландии, Норвегии, Швеции, Швейцарии и США на 100 тыс. человек в зависимости от солнечной активности. Особенно их быстрый рост произошел в Швейцарии в 1979 г., в Японии – в 1998 г. (прирост по отношению к предыдущему году составил 34.7%), когда были максимумы солнечной активности. Источник: https://en.wikipedia.org/wiki/Suicide_in_Japan

И в наше время по-прежнему появляются работы, указывающие на присутствие 11-летней солнечной ритмики во временном ходе этих показателей не только в Японии, но и в Австралии и северных областях России¹⁷.

Революции и массовые беспорядки

А.Л. Чижевский был не единственным, кто в то время обратил внимание на совпадение дат наступления революций с эпохами максимумов СА. Об этом

писали Д.О. Святский (1917), В.И. Анучин (1918), американец У. Дж. Сайдис (1918), француз Т. Морэ (1920), В.М. Бехтерев (1921). Скорее Чижевскому принадлежит заслуга обобщения этих наблюдений и утверждение, что причиной может быть влияние СА на психику больших масс людей. Его современник, классик мировой социологии П.А. Сорокин выразился по поводу революций весьма деликатно, назвав их «социальной болезнью»¹⁸.

Повторение исследований А.Л. Чижевского по анализу моментов уси-

¹⁷ Шумилов О.И., Касаткина Е.А., Клейменова Н.Г., Храмов А.В., Мегорская И.П. Суициды и смертность от сердечно-сосудистых заболеваний в связи с факторами космической погоды в высоких широтах // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19. № 2. С. 45–56.

¹⁸ Бреус Т.К., Владимирский Б.М., Зелёный Л.М. Неоконченные споры к 120-летию со дня рождения А.Л. Чижевского // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. № 12. С. 1110–1118.

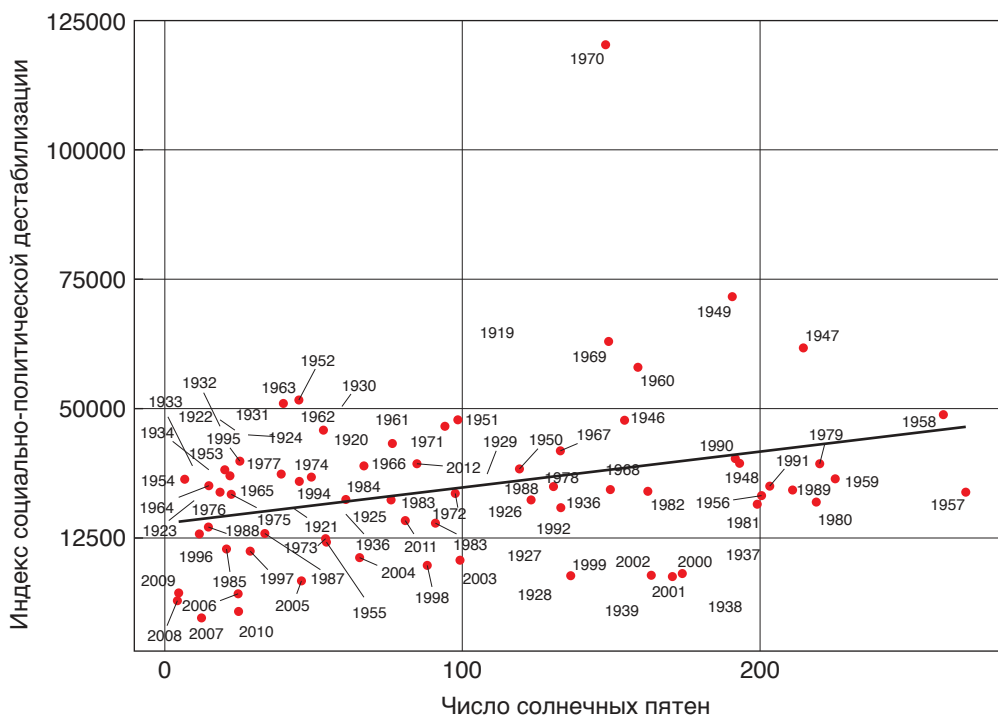


Рис. 12. Диаграмма корреляции между среднегодовыми числами Вольфа и калиброванным индексом социально-политической дестабилизации на базе данных CNTS, 1946–2012 гг.
Источник: <https://www.socionauki.ru/journal/articles/696903/?ysclid=m3oad6z4dv912429711>

ления массовых беспорядков в современных условиях было выполнено на материалах базы данных CNTS (Cross National Time Series – Межнациональные временные ряды), в интервале 1946–2012 гг. (т. е. с конца 17-го до начала 24-го цикла). Данная база содержит значения «интегрального индекса глобальной социально-политической дестабилизации», вычисленного для разных стран на основе подсчета таких событий, как политические убийства, забастовки, правительственные кризисы, партизанские действия, политические репрессии, массовые беспорядки, революции и антиправительственные демонстрации (всего около 200 переменных для более чем 200 стран). В качестве индекса СА авторы

использовали годовые значения чисел Вольфа¹⁹.

Для таких показателей, как «мирные демонстрации» и «политические убийства», связи моментов их усиления с уровнем СА не обнаружено. В то же время практически для всех остальных параметров, напрямую связанных с психическим напряжением масс, были обнаружены статистически значимые величины ($p \leq 0.001$) линейной корреляции между значениями мирового индекса социальной нестабильности и числами Вольфа

¹⁹ Кортаев А.В., Билюга С.Э., Малков С.Ю., Осипов Д.А. О солнечной активности как возможном факторе социально-политической дестабилизации // История и современность. 2016. № 2. С. 180–209.

($r = 0.344 \pm 0.0025$). В целом авторы отмечают, что фактор СА объясняет около 12% всей вариации интегрального индекса глобальной социально-политической дестабилизации.

По мнению Б.М. Владимирского и Л.Д. Кисловского, в событиях новейшей истории России прослеживаются те же черты: вооруженные силы СССР вводились в соседние страны каждый очередной максимум активности Солнца: 1957 г. (Венгрия), 1968 г. (Чехословакия), 1980 г. (Афганистан)²⁰. В 1991 г. распался сам СССР. Однако эти примеры скорее могут послужить просто дополнительной иллюстрацией, в отличие от процитированной работы А.В. Коротаева с коллегами, выполненной на большой статистическом материале.

Исследования в суточном масштабе данных

Как уже было упомянуто выше, использование суточного масштаба дискретизации данных, в отличие от годового и месячного, позволяет различить на шкале времени моменты начала солнечных вспышек, неразрывно связанных с ними подъемов интенсивности электромагнитного излучения всех диапазонов, а также релятивистских протонов и обусловленных этими вспышками магнитных бурь, запаздывающих на 1–3 суток относительно вспышки. Кроме того, значительным прорывом, дающим новые возможности для анализа, стали в XXI в. свободный доступ к онлайн базам гелиофизических, геофизических и метеорологических данных, а также новые вычислительные и алгоритмические возможности.

²⁰ Владимирский Б.М., Кисловский Л.Д. Биофизика и история // Биофизика. 1998. № 5 (43). С. 757–760.

Этими причинами преимущественно объясняется ряд серьезных изменений в современной гелиобиологии:

1) кардинальное увеличение частоты дискретизации выборки данных (не годы и месяцы, а сутки, часы и даже минуты) позволяет различать явления космической погоды на шкале времени и ответы различных систем организма;

2) усиление детализации параметров космической погоды (не магнитная буря, а «бури с внезапным и постепенным началом», «сопровождаемые Форбуш-понижениями»²¹ или без них» и т. д.) позволяет говорить уже не об индикаторах определенных событий, а о возможной природе действующего агента;

3) детализация конкретных заболеваний внутри больших нозологических групп²² (не «сердечно-сосудистые катастрофы», а обострения ишемической болезни сердца, инфаркты миокарда и т. д.) дает возможность строить многоуровневые рабочие модели развития физиологической реакции от изменения состояния первичных мишеней к системному ответу организма.

По отношению к суточному и минутному масштабам дискретизации данных задача воспроизведения гелиобиологических эффектов в условиях лаборатории звучит уже не столь фантастически, как по отношению к многолетним процессам. И такие успешные эксперименты уже появляются в последние годы, по крайней мере,

²¹ Эффект кратковременного и резкого понижения интенсивности галактических космических лучей происходит в результате возмущений межпланетного магнитного поля, переносимых солнечным ветром от Солнца к границам гелиосферы.

²² В медицине нозология – раздел, занимающийся классификацией и изучением заболеваний. Нозологические группы – совокупность людей, имеющих схожие признаки патологии или родственные заболевания.

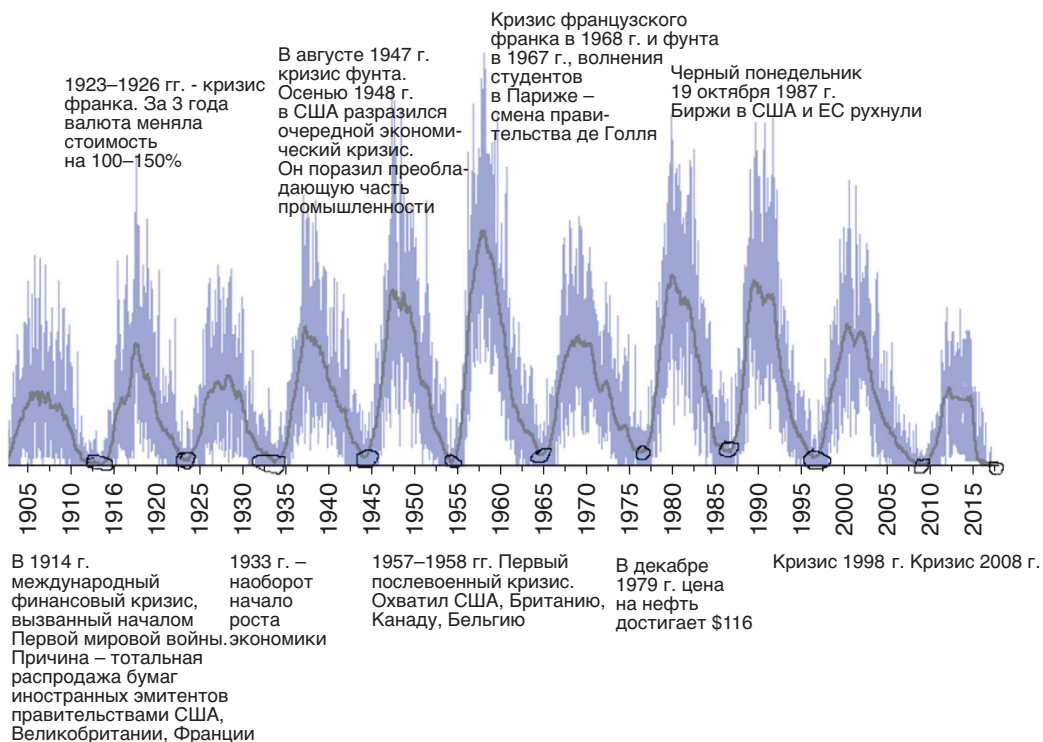


Рис. 13. Уровень вспышек на Солнце в 1905–2015 гг. и произошедшие кризисы в мире.
 Источник: <http://forum.dreamhackers.org/lofiversion/index.php?t22487-600.html>

в отношении возможности прямого влияния записанной магнитной бури на интактные (от лат. *intactus* – нетронутый) живые организмы²³.

Но здесь возникает новая методологическая проблема: живой организм является намного более сложной системой, чем хотелось бы физикам, а система факторов космической погоды, управляемых СА – намного

более сложной системой, чем хотелось бы биологам и медикам. Фактически в любом временном масштабе мы вынуждены иметь дело с взаимодействием двух сложных систем, каждая из которых обладает иерархическим устройством с великим множеством обратных связей, и ни одну из них невозможно корректно заменить упрощенной моделью, допускающей обоснованно поставленный физический эксперимент. Можно воспроизвести в лаборатории электромагнитное поле с записанным спектром магнитной бури, но невозможно одновременно смоделировать изменения других внешних факторов, которыми эта буря неизбежно сопровождается в природных условиях. С другой стороны, в эксперименте можно зафиксировать факт изменения каких-то

²³ Gurfinkel Y.I., Vasin A.L., Pishchalnikov R.Y., Sarimov R.M., Sasonko M.L., Matveeva T.A. Geomagnetic storm under laboratory conditions: Randomized experiment // *Int. J. Biometeorol.*, 2018. Vol. 62. P. 501–512; Kantserova N.P., Krylov V.V., Lysenko L.A. et al. Geomagnetic Storm Effects on the Calpain Family Calcium-Dependent Proteases of Some Invertebrate and Fish Species // *Russ. J. Bioorg. Chem.*, 2018. Vol. 44. P. 73–79.

физиологических параметров организма в результате действия этого искусственного магнитного поля. При этом трудно установить, изменение каких параметров представляет собой причину, а что является уже следствием формирования биологического ответа. Эта ситуация напоминает древнеиндийскую притчу «Слепые и слон» об изучении отдельных частей слона без возможности увидеть его целиком. Следовательно, в настоящее время мы вынуждены подавляющее большинство солнечно-биосферных исследований проводить в режиме пассивного наблюдения за биологическими объектами на тех или иных интервалах времени.

Применительно к медицинским исследованиям это означает выявление статистической и временной связи между динамикой различных показателей космической погоды (уже не обязательно экстремальных) и особенностями в массовом развитии осложнений заболеваний.

Динамика сердечно-сосудистых заболеваний

Современных нам (опубликованных уже в XXI в.) исследований по медицинским эффектам космической погоды в точном масштабе данных в литературе встречается намного больше, чем работ по изучению многолетних ритмов, рассмотренных в предыдущем разделе.

В качестве типичных примеров отдельных исследований можно привести результаты анализа поступления пациентов в больницы Литвы (данные 2004–2005 гг.): для пациентов с острым коронарным синдромом²⁴, если в день

поступления в больницу регистрировалась магнитная буря, то риск смерти таких пациентов увеличивался в полтора раза²⁵. Для пациентов, поступающих по поводу инфаркта миокарда с подъемом сегмента ST, если перед этим в течение двух-трех дней наблюдались солнечное протонное событие в сочетании с последующей магнитной бурей, число госпитализаций увеличивалось на 39%²⁶.

Поскольку аналогичных публикаций много, целесообразнее провести их систематизацию, чем приводить отдельные примеры. Такие работы можно классифицировать по двум критериям: по типу заболевания и по включенным в анализ параметрам космической погоды (солнечные, геиосферные или геомагнитные), потому что оба набора исследуемых параметров довольно обширны.

Еще около 25 лет назад было обнаружено и продолжает стабильно подтверждаться на новых сведениях, что среди различных групп заболеваний эффекты космической погоды чаще всего обнаруживаются в данных госпитализации от сердечно-сосудистых осложнений: общей внезапной смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, обострения ишемической болезни сердца, острого инфаркта миокарда, острого коронарного синдрома, инсультов, а также резкого повышения артериального давления²⁷.

²⁵ Vencloviene J., Babarskiene R., Milvidaite I., Kubilius R., Stasionyte J. The effect of solar-geomagnetic activity during and after admission on survival in patients with acute coronary syndromes // Int. J. Biometeorol. 2014. Aug. Vol. 58 (6). P. 1295–1303.

²⁶ Vencloviene J., Babarskiene R. & Slapikas R. The association between solar particle events, geomagnetic storms, and hospital admissions for myocardial infarction // Nat. Hazards. 2013. Vol. 65. P. 1–12.

²⁷ Бреус Т.К., Панопом С.И. Магнитные бури – медико-биологические и геофизические аспекты. М.: Советский спорт, 2003.

²⁴ Острый коронарный синдром – любая группа клинических признаков или симптомов, позволяющих подозревать нестабильную стенокардию или острый инфаркт миокарда. Не являясь диагнозом, может быть использован при первом контакте врача с больным.

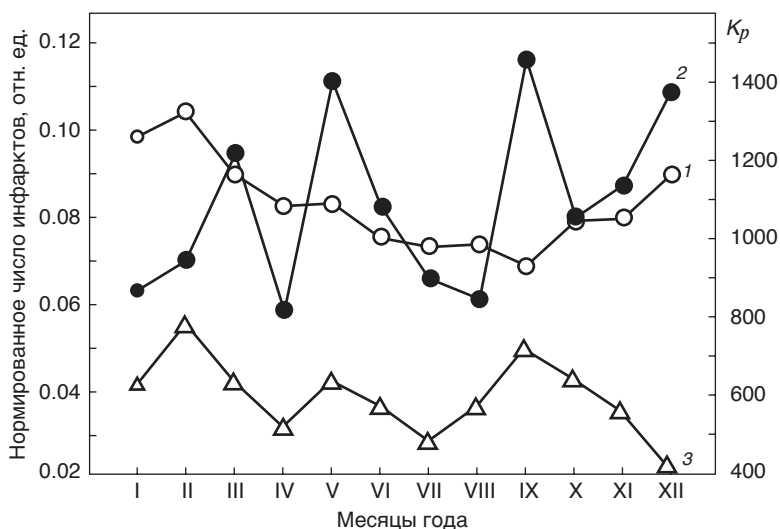


Рис. 14. Вариации месячных значений показателя общей смертности от инфаркта миокарда в Болгарии (1) и числа вызовов бригад скорой помощи в г. Якутске по поводу сердечно-сосудистых осложнений (2) и планетарной геомагнитной активности (3) в 1992 г. Источник: Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12, № 4. С. 50

Географическое распределение таких исследований оказывается очень широким и включает Испанию, Литву, Россию, Израиль, Кубу и Мексику, Грецию, Азербайджан. Интересно, что в данном списке значительную часть составляют южные страны, хотя долгое время существовало мнение, что жители северных широт более подвержены негативному влиянию геомагнитных возмущений.

Есть даже мета-исследования, где собраны данные из нескольких крупных популяционных исследований заболеваемости инсультом в Новой Зеландии, Австралии, Великобритании, Франции и Швеции, проведенных в период с 1981 по 2004 г.²⁸ Авторы дела-

ют вывод, что геомагнитные бури с индексом $A_p > 60$ нТл связаны с увеличением риска возникновения инсульта на 19%, а сильные и экстремальные бури ($A_p > 100$ нТл) – на 52%.

Другое большое эпидемиологическое исследование показало сильное влияние не только планетарных магнитных бурь, но и средней интенсивности геомагнитных возмущений на смертность от сердечно-сосудистых заболеваний в 263 городах США²⁹.

В отличие от многолетней ритмики СА, где в последние годы в качестве возможного действующего агента рассматривали интенсивность УФ-излучения, в случае суточных данных практически все авторы (включая и мета-исследования), сообщают о значимом росте практически всех проанализированных

²⁸ Feigin V.L., Parmar P.G., Barker-Collo S., Bennett D.A. et al. International Stroke Incidence Studies Data Pooling Project Collaborators. Geomagnetic storms can trigger stroke: evidence from 6 large population-based studies in Europe and Australasia // Stroke. 2014. Jun. Vol. 45 (6). P. 1639–1645.

²⁹ Zilli Vieira C.L., Alvares D., Blomberg A. et al. Geomagnetic disturbances driven by solar activity enhance total and cardiovascular mortality risk in 263 U.S. cities // Environ Health. 2019. Vol. 18. P. 83.

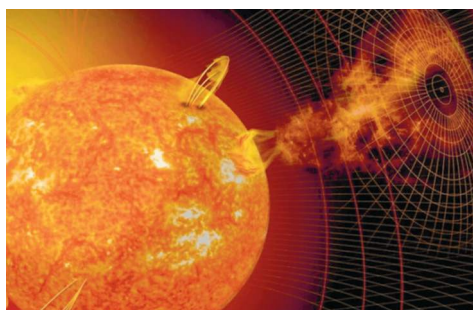


Рис. 15. Иллюстрация, показывающая влияние солнечных процессов на биосферу Земли

видов заболеваемости при повышении уровня геомагнитной активности. Кто-то сообщает о планетарных магнитных бурях, кто-то просто о повышении значений Кр- или Ар-индекса, кто-то использует в анализе менее распространенные индексы, такие как ULF (Ultra Low Frequency Index)³⁰ и PC (Polar Cap Index)³¹, но все описываемые ими явления имеют одну физическую природу. В то же время сообщения о повышении числа сердечно-сосудистых осложнений в моменты наступления других явлений космической погоды, таких как собственно солнечные вспышки (а значит возрастания УФ-излучения), солнечные протонные события, приход к Земле ударной волны солнечного ветра, Форбуш-понижения встречаются намного реже, фактически в отдельных работах.

Со временем в такие исследования включаются все более крупные выборки событий, счет идет на сотни тысяч и миллионы случаев. Однако постепенно становится очевидным, что чем больше рассматриваемая выборка, чем

более длинный интервал времени или географический ареал она покрывает, тем, с неизбежностью, большее количество не учитываемых факторов содержится в анализируемых данных. Которые, в свою очередь, могут очень эффективно маскировать эффекты космической погоды. Поэтому в гелиобиологии принцип «чем больше – тем лучше» почти никогда не выполняется. Одним из таких однозначно установленных факторов являются текущие метеоусловия, которые играют значительную роль в осложнении заболеваний и могут «перекрывать» эффект космической погоды. Однако в некоторых случаях даже исследование очень массивных выборок данных позволяет выявить эффекты космической погоды, о чем пойдет речь в следующем разделе.

Космическая погода и настроение масс

Оказалось, что, в отличие от состояния здоровья больших масс населения Земли, закрытого законами о персональной информации, настроение этих больших масс вполне поддается анализу и измерению. В работе В.А. Ожередова с коллегами проведена оценка изменения настроения участников научного форума dxdy.ru³². Авторы проанализировали сообщения участников форума dxdy.ru практически за все время его существования: с мая 2006 по октябрь 2019 г., всего 327 673 сообщения, содержащие в общей сложности 57 324 896 слов. Оценивали ежедневные частоты появления так называемых эмоционально окрашенных слов в сообщениях пользователей форума.

³⁰ Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Yumoto K.J. et al. In search of new ULF wave index: Comparison of Pc5 power with dynamics of geostationary relativistic electrons // Planet. Space Science. 2007. Vol. 55 (6). P. 755–769.

³¹ Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerstrum S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap: a new index // Planet. Space Sci. 1988. Vol. 36. P. 1095.

³² Он представляет собой площадку для общения ученых всего земного шара. На нем обсуждается самый широкий спектр тем по разным направлениям – от физики, математики, химии, компьютерных наук до политики, экономики, литературы и искусства, а число пользователей насчитывает несколько сотен тысяч.

Для дискуссий на научных форумах подобные эмоциональные слова не характерны и сигнализируют о повышенной степени возбуждения спорящих. Авторам удалось показать, что доля эмоционально окрашенных слов определенной группы среди всех слов, из которых состоят сообщения за каждый конкретный день, достаточно хорошо коррелирует с Кр-индексом на протяжении всего 12-летнего интервала наблюдений: $r \approx 0.4$, $p < 0.0001$. При этом корреляция везде со знаком плюс, т. е. повышение уровня геомагнитной активности сопровождается повышением эмоциональности дискуссии на научном форуме. Можно предположить, что в интернет-сообществах, где нейтральный тон сообщений участников не является «принятым по умолчанию», такое повышение эмоционального фона выражено еще сильнее, однако его сложнее доказательно выявить. Авторы отмечают, что их результаты, во-первых, подтверждают вывод А.Л. Чижевского о связи поведенческой психологии человека и солнечной активности на популяционном уровне, во-вторых, позволяют вплотную приблизиться к созданию методов прогноза массовых психологических срывов³³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрен ряд современных примеров проявления эффектов космической погоды в социальных процессах³⁴ и в динамике заболеваемости в разных странах. Прочитрованы результаты, полученные уже после

2000 г., на больших массивах данных (вплоть до десятков тысяч и даже миллионов случаев), а также за большой промежуток времени, с середины прошлого века до современности. Описаны проявления 11-летней солнечной ритмики во временных распределениях эпидемий и числа самоубийств, в вероятности развития аутоиммунных и психических заболеваний в зависимости от момента рождения, а также в продолжительности жизни. В качестве наиболее вероятной причины таких эффектов рассматривается разрушительное действие ультрафиолетового излучения в периоды максимумов солнечной активности.

Также рассмотрены результаты большой выборки современных исследований по возможному вкладу космической погоды в динамику осложнений различных видов сердечно-сосудистых заболеваний. Практически во всех проанализированных работах из разных стран делается вывод, что основным геофизическим фактором, управляемым солнечной активностью, и влияющим на риск развития сердечно-сосудистых осложнений, является повышение уровня геомагнитной активности, а наиболее опасными моментами являются день начала магнитной бури и последующие 2–3 суток. Это заключение полностью согласуется с основной гипотезой конца XX в. об опасности магнитных бурь.

Итак, в XXI в., несмотря на кардинальное изменение характеристик окружающей среды, многократное усиление техногенного электромагнитного излучения в очень широком диапазоне частот, повсеместное присутствие электричества во всех сферах жизни человека, а также прорывных открытий в области медицины, проявления вклада солнечной ритмики обнаруживаются в динамике современных медико-биологических и социально-психологических процессов.

³³ Ожередов В.А., Бреус Т.К., Зелёный Л.М. Связь интеллектуальной возбудимости пользователей сети Интернет с повышением солнечной активности // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 4. С. 37–50.

³⁴ Владимирский Б.М. «Космическая погода» и социальные явления // Земля и Вселенная. 2003. № 3. С. 82–87.

СОЛНЦЕ И КЛИМАТ В ЗАДАЧАХ И ОТВЕТАХ

Научный и организационный комитет первой Школы молодых ученых ИКИ РАН
«Солнце и космос», ноябрь 2023 года

Поступила в редакцию: 11.09.2024
Принята к публикации: 11.09.2024

DOI: 10.7868/S0044394824060070

Влияние Солнца на климат – бесконечная по научной емкости тема, тесно связанная не только с физикой Солнца, но и с историей Земли, которая за более чем 4 миллиарда лет своего существования претерпевала не раз резкие и часто не вполне объяснимые климатические изменения. Физика влияния Солнца на климат Земли одновременно и очевидная, и исключительно запутанная. С одной стороны, Солнце является по сути единственным источником тепловой энергии для нашей планеты (все иные источники, например, внутреннее тепло, являются лишь малыми поправками). В этом смысле то, что именно энергия Солнца главным образом определяет земной климат (как минимум среднюю температуру на планете), не требует доказательств. С другой стороны, светимость Солнца как звезды главной последовательности является эволюционно почти стабильной. Существует плавный рост светимости (приблизительно на 10% за 1 миллиард лет), но как минимум в нем отсутствуют резкие скачки и перепады. С этой точки зрения быстрые изменения климата на Земле, по-видимому, не могут быть объяснены как результат таких же быстрых изменений солнечной светимости. Существует несколько объяснений данного парадокса, некоторые из которых

вообще исключают Солнце из причин вариаций климата, полагая, что все такие вариации являются результатами каких-то катастроф, например, импактными событиями (падение метеорита) или, например, массовой вулканической деятельностью, в частности, трапповым магматизмом. Другие объяснения все же привлекают Солнце, однако не напрямую, а через косвенное влияние, например, через воздействие на парниковые газы. Такое воздействие, в частности, может оказывать солнечная активность, точнее ее жесткая компонента, а активность Солнца, в отличие от его светимости, действительно, подвержена резким изменениям.

В 2023-м году в рамках Школы молодых ученых ИКИ РАН «Солнце и космос» учащимся было предложено для решения несколько задач разного уровня сложности, целью которых было дать количественное представление о том, как вообще формируется светимость Солнца, в какой степени она определяет среднюю температуру планеты и, главное, как и в какие сроки гипотетические изменения солнечной светимости могут отразиться на климате Земли. Мы полагаем, что эти задания, а главное, их решения и пояснения к ним могут быть интересны более широкому кругу школьников,

студентов и молодых ученых и помогут им лучше разобраться в соответствующих вопросах. Ниже мы публикуем сами задания и их решения с комментариями научного комитета. Для целей научной школы решения, безусловно, были в ряде случаев упрощены, но без потери основного научного содержания.

Исходные данные для заданий

В таблице 1 приведены исходные данные для расчетов. Заметим, что для некоторых из них, например для альбедо Земли или температуры поверхности Солнца, в литературе можно встретить и несколько отличающиеся значения. Мы считаем это не критичным, так как целью упражнений является не получение точных справочных результатов, а выяснение общих принципов и закономерностей в системе солнечно-земных связей. Все размерности в работе даны в системе СИ.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Параметр	Обозначение в задании	Значение
Температура поверхности Солнца	T	5770 K
Радиус Солнца	R	6.960×10^8 м
Радиус Земли	R_z	6.371×10^6 м
Астрономическая единица	a	1.496×10^{11} м
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	5.67×10^{-8} Вт · м ⁻² · К ⁻⁴
Альбедо Земли	α	0.37
Полная тепловая энергия Солнца	W	1.25×10^{41} Дж

Задание 1

Излучение Солнца имеет тепловую природу. Это означает, что оно светит просто, как светит любое нагретое тело, например, раскаленный кусок металла. Для теплового излучения существует простая зависимость между температурой тела и излучаемой энергией. Каждый квадратный метр поверхности тела, нагретого до температуры T (в нашем случае Солнца), излучает энергию, равную

$$E = \sigma \cdot T^4 \tag{1}$$

Здесь T – температура поверхности Солнца, а σ – постоянная Стефана Больцмана. Если каждый квадратный метр Солнца излучает энергию, равную (1), то полную энергию, излучаемую Солнцем, можно найти, умножив (1) на площадь поверхности Солнца.

Используя значения радиуса Солнца из таблицы 1 и иные необходимые данные, рассчитайте светимость Солнца, т. е. полное количество энергии в Дж, которое наша звезда излучает за 1 секунду.

Задание 2

При удалении от Солнца поток излучения падает по закону обратных квадратов. Среднее расстояние от Солнца до Земли называется астрономической единицей.

Используя данное расстояние (см. таблицу 1), а также вычисленное выше значение светимости Солнца, рассчитайте, сколько солнечной энергии проходит за 1 секунду через площадь 1 м² на расстоянии орбиты Земли.

Эта величина иногда называется солнечной постоянной.

Задание 3

Не вся энергия Солнца поглощается Землей. В среднем около 37% ее отражается обратно в космос (альбедо Земли, см. таблицу 1), а остальные 63%, действительно, нагревают Землю.

Используя рассчитанную выше солнечную постоянную, а также радиус Земли и альбедо Земли, рассчитайте, какую энергию в джоулях получает вся Земля (планета в целом) от Солнца за 1 секунду.

Задание 4

При получении энергии от Солнца Земля нагревается и продолжает нагрев до тех пор, пока ее тепловое излучение за секунду времени не становится равно энергии, получаемой от Солнца за ту же секунду времени. При достижении данной равновесной температуры, наступает тепловой баланс. Так определяется средняя температура планет. Таким образом, средняя температура Земли – это та температура, при которой тепловое излучение Земли, определяемое по формуле (1), точно равно энергии, поглощаемой от Солнца.

Используя рассчитанные ранее значения поглощаемой солнечной энергии, рассчитайте среднюю температуру Земли, при которой ее тепловое излучение находится в балансе с поглощенным излучением Солнца.

Имейте в виду, что полученное значение будет в Кельвинах, т. е. в абсолютных единицах. Если Вы хотите получить среднюю температуру Земли в градусах Цельсия, вычтите из полученного значения 273 °С.

Если Вы провели расчет правильно, то полученное значение окажется примерно на 40 градусов ниже, чем фак-

тическая средняя температура Земли, равная примерно +15 °С. Эта разница возникает из-за парникового эффекта, который, таким образом, не является абсолютным злом, как это иногда преподносят, а в некотором смысле обеспечивает фактический более теплый климат, чем его может обеспечить Солнце без такой «помощи». Заметим также, что основным парниковым газом в атмосфере Земли является не углекислый газ, а водяной пар, возникающий в основном в результате испарения воды с поверхности океанов.

Задание 5

Известно, что орбита Земли – это эллипс, который довольно похож на круг, но все же не является им. Из-за этого, Земля раз в год (примерно 3 января) приближается к Солнцу наиболее близко, а примерно 3 июня находится от Солнца наиболее далеко. Приблизительно минимальное расстояние до Солнца $a_{\min} = 147$ млн км, а максимальное $a_{\max} = 152$ млн км. По этой причине средняя температура Земли также меняется в течение года.

Задание 5а: Определите, на сколько градусов возрастает температура на Земле в январе и на сколько снижается в июне.

Задание 5б: Подумайте в этой связи, где более суровые зимы и где более мягкое лето – в северном или южном полушарии.

Задание 6

Согласно модели звездной эволюции, звезды типа Солнца каждый миллиард лет увеличивают свою светимость примерно на 10%.

Определите, на сколько градусов ниже была средняя температуры на

Земле 1 миллиард лет назад и насколько выше будет средняя температура через 1 миллиард лет.

Задание 7

Теперь представим невозможную ситуацию, что на Солнце неожиданно прекратились реакции термоядерного синтеза. Некоторые люди думают, что через 500 секунд (время на прохождение света от Солнца до Земли) после этого на Земле наступит темнота. Но мы понимаем, что Солнце светит не за счет термоядерных реакций, а за счет своего тепла, поэтому погаснуть не может. Точно также как не остывает мгновенно кирпичная печка после того, как погас огонь, а продолжает «светить» всю ночь.

Полная тепловая энергия Солнца W приведена в таблице 1. Она может быть, в частности, оценена по теореме вириала, но это не имеет отношения к данному заданию.

Если предположить, что воображаемое Солнце, в котором внезапно остановились ядерные реакции, продолжает светить с той же интенсивностью, что и сейчас, то на сколько лет хватит его запасов тепловой энергии, то есть через сколько миллионов лет оно погаснет по-настоящему?

Задание 8

Теперь оценим эту задачу более корректно, ближе к реальности. Учтем, что, так как воображаемое Солнце, в котором прекратились реакции синтеза, продолжает светить, то оно теряет энергию, которая больше не восполняется. Поскольку тепловая энергия Солнца снижается, то будет снижаться и его температура, а следовательно, и светимость (см. формулу (1)).

Для простоты можно предположить, что падение температуры пропорционально уменьшению полной тепловой энергии. То есть, если тепловая энергия уменьшилась на 1%, то и температура уменьшилась на 1%.

Через сколько лет при такой «модели» остывания светимость Солнца снизится на 1%?

Задание 9

Определите, через сколько лет в такой «модели» температура на Земле снизится на 1 градус.

Задания 10 (а, б, в) – повышенной сложности

В целом, как нетрудно догадаться, остывание Солнца и Земли происходит приблизительно по экспоненциальному закону. С учетом этого, рассчитайте следующие времена.

Задание 10а: Определите, через сколько лет светимость Солнца снизится в 10, 100 и 1000 раз.

Задание 10б: Если считать, что границей красного цвета является длина волны 600 нм, то через какое время после «выключения термоядерных реакций» Солнце станет «красной звездой»? Можно предположить, что звезда становится красной, когда в соответствующий диапазон попадает максимум ее теплового излучения (по закону Вина).

Задание 10в: Если считать средней температурой Земли величину 15 °C и предположить, что массовое заморозание мирового океана начнется при падении средней температуры до 0 °C, то через сколько лет после «выключения термоядерных реакций» это произойдет?

ОТВЕТЫ И КРАТКИЕ РЕШЕНИЯ

Ответ к задаче 1

Обозначим светимость Солнца как L . Тогда

$$L = 4\pi\sigma R^2 T^4 \approx 3.8 \times 10^{26} \text{ Вт [Дж/с]}.$$

Ответ к задаче 2

Обозначим солнечную постоянную как s . Тогда

$$s = \frac{L}{4\pi a^2} \approx 1360 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (2)$$

Ответ к задаче 3

Земля (шар с радиусом R_z) образует на пути солнечного излучения препятствие с сечением, равным сечению круга радиуса R_z . Полная энергия, которую получает от Солнца наша планета за секунду времени, таким образом, равна

$$E_{in} = \pi R_z^2 (1 - \alpha) \approx 1.1 \times 10^{17} \text{ Вт [Дж/с]}.$$

Ответ к задаче 4

Полная тепловая энергия, излучаемая Землей, определяется таким же способом, как и полная энергия, излучаемая Солнцем:

$$E_{out} = 4\pi\sigma R_z^2 T_z^4.$$

Приравниваем «входящую» энергию от Солнца, E_{in} , и исходящую, теряемую с излучением, E_{out} . Получаем:

$$\pi R_z^2 (1 - \alpha) = 4\pi\sigma R_z^2 T_z^4.$$

Отсюда температура Земли

$$T_z = \left(\frac{s \cdot (1 - \alpha)}{4 \cdot \sigma} \right)^{1/4} \approx 248 \text{ К} \approx -25^\circ \text{С}. \quad (3)$$

Так как фактическая средняя температура Земли составляет около $+15^\circ \text{С}$, то вклад парниковых газов в климат составляет около 40 градусов.

Можно заметить, что в формулу для температуры Земли не входит ее радиус. Это означает, что все тела на заданном расстоянии от Солнца имеют приблизительно одинаковую температуру, хотя по факту возможны различия из-за разных свойств материалов.

Ответ к задаче 5

Для определения зависимости температуры Земли от расстояния от Солнца нужно, чтобы в формуле (3) в явном виде появилось это расстояние. Для этого подставим в (3) формулу (2). Получаем

$$T_z = \left(\frac{L \cdot (1 - \alpha)}{16\pi\sigma a^2} \right)^{1/4}.$$

Подставляем сюда поочередно $a_{\min} = 147$ млн км и максимальное $a_{\max} = 152$ млн км. Получаем, что средняя температура Земли в течение года меняется приблизительно от 246 К (-27°С) в июле до 250 К (-23°С) в январе, т. е. отклоняется от среднего значения на ± 2 градуса.

Для северного полушария: зимой температура повышается (мягкая зима), а летом понижается (мягкое лето). Для южного полушария: зимой температура дополнительно снижается (суровая зима), а летом повышается (более жаркое лето).

Ответ к задаче 6

Для решения можно использовать формулу (4), где температура Земли прямо выражается через светимость Солнца. В формулу нужно подставить значение светимости 1 миллиард лет назад (0.9 L) и через 1 миллиард лет (1.1 L). Получаем, что равновесная температура на Земле 1 миллиард лет назад была приблизительно на 6 градусов ниже, чем сегодня, а через

1 миллиард лет назад будет выше примерно на те же 6 градусов.

Ответ к задаче 7

Время полного остывания Солнца при постоянной светимости может быть получено делением его полной тепловой энергии W на светимость L , так как светимость – это как раз потери энергии Солнца за 1 сек. Ответ при этом получится в секундах.

$$\Delta t_{\text{sun}} = \frac{W}{L} \approx 3.27 \times 10^{14} \text{ с} \approx 10.4 \text{ млн лет.}$$

Таким образом, Солнце хранит в себе запасы тепла, которых при сохранении текущего темпа излучения хватит на 10 миллионов лет.

Ответ к задаче 8

Приведено упрощенное решение, не требующее применения дифференциального исчисления. Это допустимо, так как в условии идет речь о малых отклонениях от среднего.

Рассмотрим остывающее Солнце. Температура Солнца может быть определена из его светимости L по формуле (см. задачу 1):

$$T = \left(\frac{L}{4\pi\sigma R^2} \right)^{1/4}.$$

Предположим, что светимость Солнца снизилась на 1%, т. е. стала равна $0.99 \times L$. Соответствующая температура равна 5755.5 К. Изменение температуры по сравнению с начальной (5770 К) составляет 0.25%. Согласно условию, полная тепловая энергия Солнца ($W = 1.25 \times 10^{41}$ Дж) также снизилась на 0.251%, т. е. на 3.14×10^{38} Дж. Поделив эту величину на светимость Солнца, получаем, что светимость Солнца снизится на 1% за время $\Delta t \approx 26$ тыс. лет.

Ответ к задаче 9

Получим формулу, которая связывает температуру Солнца T и температуру Земли T_z . Так как читатель, как мы полагаем, уже к этому времени достаточно хорошо разобрался в соответствующем математическом аппарате, то приведем ее без вывода:

$$T = \left(\frac{4 \cdot a^2}{R^2(1 - \alpha)} \right)^{1/4},$$

$$T_z \approx 23.3 T_z.$$

Это означает, что для изменения температуры Земли на 1 °С температура Солнца должна измениться примерно на 23.3 градуса или на 0.40%. Далее методом, описанным в задании 8, можно получить, что соответствующее время $\Delta t \approx 42$ тыс. лет. Иными словами, даже мгновенное полное прекращение термоядерных в солнечном ядре даст человечеству достаточно большой запас времени для продумывания своей дальнейшей судьбы.

Ответы к задаче 10

Так как задача 10 заявлена как задача повышенной сложности, мы публикуем только ответы:

Ответ к задаче 10а: Времена, за которые светимость Солнца снизится в 10, 100 и 1000 раз приведены в таблице 2.

Время на уменьшение светимости Солнца		
в 10 раз	в 100 раз	в 1000 раз
≈ 15 млн лет	≈ 100 млн лет	≈ 600 млн лет

Ответ к задаче 10б: Время на превращение Солнца в «красную» звезду ≈ 2.5 млн лет.

Ответ к задаче 10в: время до замерзания мирового океана ≈ 500 тыс. лет.

Коротко и интересно

«ДЖЕЙМС УЭББ» ОБНАРУЖИЛ САМУЮ МАЛЕНЬКУЮ БЛУЖДАЮЩУЮ ПЛАНЕТУ

Поступила в редакцию: 27.12.2024

Принята к публикации: 27.12.2024

DOI: 10.7868/50044394824060082

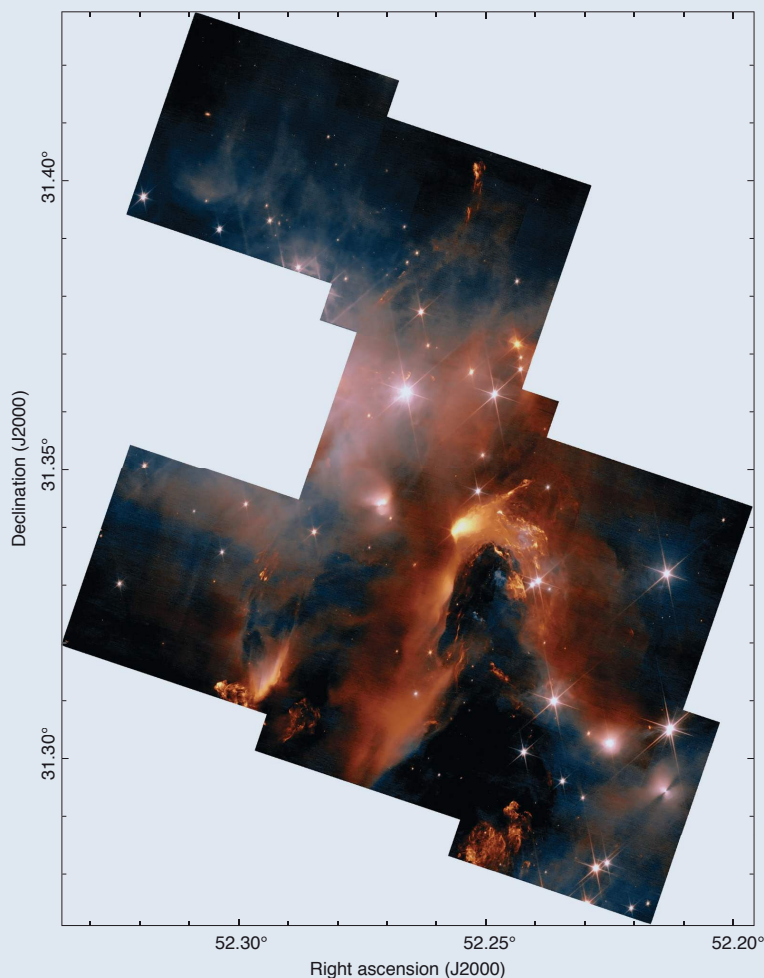


Рис. 1. Изображение туманности NGC 1333, сделанное с помощью инструмента NIRISS космического телескопа им. Джеймса Уэбба. Источник: Adam B. Langeveld et al. *The Astronomical Journal*, 2024; 168(4)

Космический телескоп им. Джеймса Уэбба (JWST, NASA) обнаружил шесть свободно плавающих планет или планет-странников в звездном скопле-

нии туманности NGC1333, которая расположена в 960 световых годах от Земли в созвездии Персея. Как считают авторы открытия, им удалось выяснить,

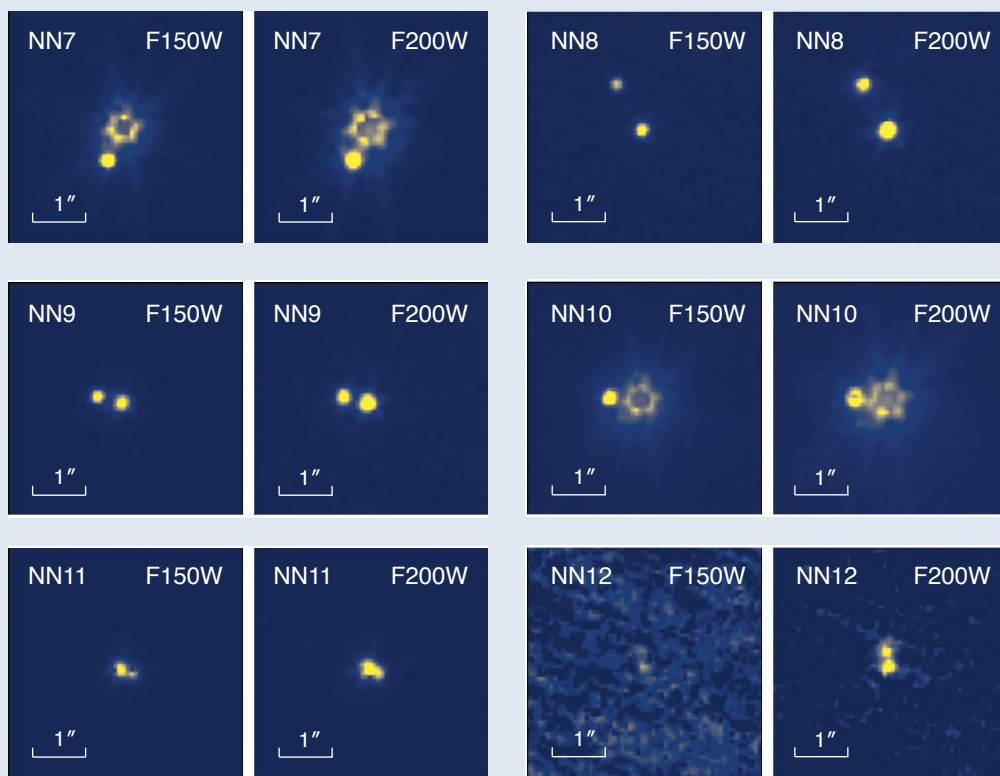


Рис. 2. Изображение кандидатов в блуждающие планеты, идентифицированные на снимках NIRISS. Источник: Источник: Adam B. Langeveld et al. *The Astronomical Journal*. 2024; 168(4)

что наименьшая масса таких объектов не должна превышать пяти масс Юпитера.

Изображения, которые анализировали астрономы, были сделаны с помощью одного из четырех основных научных приборов обсерватории JWST – NIRISS (Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph), который включает в себя камеру и бесщелевой спектрограф, работающие в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне длин волн.

Это не первое открытие планетостранников. Например, JWST находил подобные объекты в 2023 г. в туманности Ориона. Но нынешнее исследование интересно тем, что позволяет лучше понять, как такие небесные тела образуются и как часто встречаются.

Как объясняют астрономы, в настоящее время известно, что объекты планетарной массы образуются по крайней мере двумя разными способами. Первый способ – это формирование планет в газопылевом облаке протопланетных дисков вокруг формирующейся звезды путем постепенной аккреции и роста. Именно так формировались планеты Солнечной системы. Второй способ – когда планета формируется как звезда в сжатии облака газа и пыли.

Известно также, что наименьшая масса, когда достигается необходимая для запуска термоядерной реакции и образования звезды температура и давление ядра, составляет около

9% массы нашего Солнца или около 93 масс Юпитера.

Ниже этой минимальной массы находятся коричневые карлики – газобразные объекты, не являющиеся звездами в том смысле, что внутри не протекают термоядерные реакции, но слишком массивные для того, чтобы быть планетами. Коричневые карлики имеют массу до 13 масс Юпитера. Предполагалось, что все что меньше, уж точно не может быть звездой, а является планетой на орбите вокруг звезды.

Объекты, обнаруженные в NGC1333 авторами нынешнего исследования, опровергают это предположение. Они недостаточно массивны, чтобы стать звездами, но в то же время не находятся на орбите вокруг другой звезды, а формируются так же, как коричневые карлики и звезды.

«Мы обнаружили шесть кандидатов в планеты-странники с предполагаемой массой от 5 до 15 масс Юпитера. Но самое любопытное это то, что одна из этих планет претендует на роль объекта с наименьшей массой планеты-странника – это планета с пятью массами Юпитера. Хотя JWST обладает достаточной чувствительностью, чтобы зафиксировать блуждающие планеты массой меньше этого значения, ни одной такой в NGC1333 он не выявил. Кроме того, наши результаты показывают, что доля блуждающих планет в NGC1333 составляет примерно 10% от числа всех объектов скопления, что значительно больше, чем ожидалось», – пишут авторы в статье, которая недавно была опубликована в *The Astronomical Journal*.

Adam B. Langeveld et al. The JWST/NIRISS Deep Spectroscopic Survey for Young Brown Dwarfs and Free-floating Planets. The Astronomical Journal. 2024; 168(4):168–179.

James Webb Space Telescope finds 6 wandering rogue planets that formed just like stars
<https://www.space.com/james-webb-space-telescope-rogue-planets-star-formation>

ВУЛКАНИЗМ НА ЛУНЕ СТАЛ МОЛОЖЕ

DOI: 10.7868/S0044394824060094

Поступила в редакцию: 27.12.2024
Принята к публикации: 27.12.2024

Геохимики из Института геологии и геофизики Китайской академии наук в Пекине под руководством профессора Чжана Цяня (Zhang Qian) с помощью нескольких методов провели анализ микроскопических стеклянных капель в образцах лунного грунта,

Рис. 1. Моря на Луне – проявление вулканизма. Изображение Луны, сделанное миссией NASA «Апполон-12» в 1969 г. Слева – Море Спокойствия, сверху – Море Кризисов, справа – Море Краевое и Море Сумма.
Источник: NASA Official: Dr. David R. Williams, David.R.Williams@nasa.gov



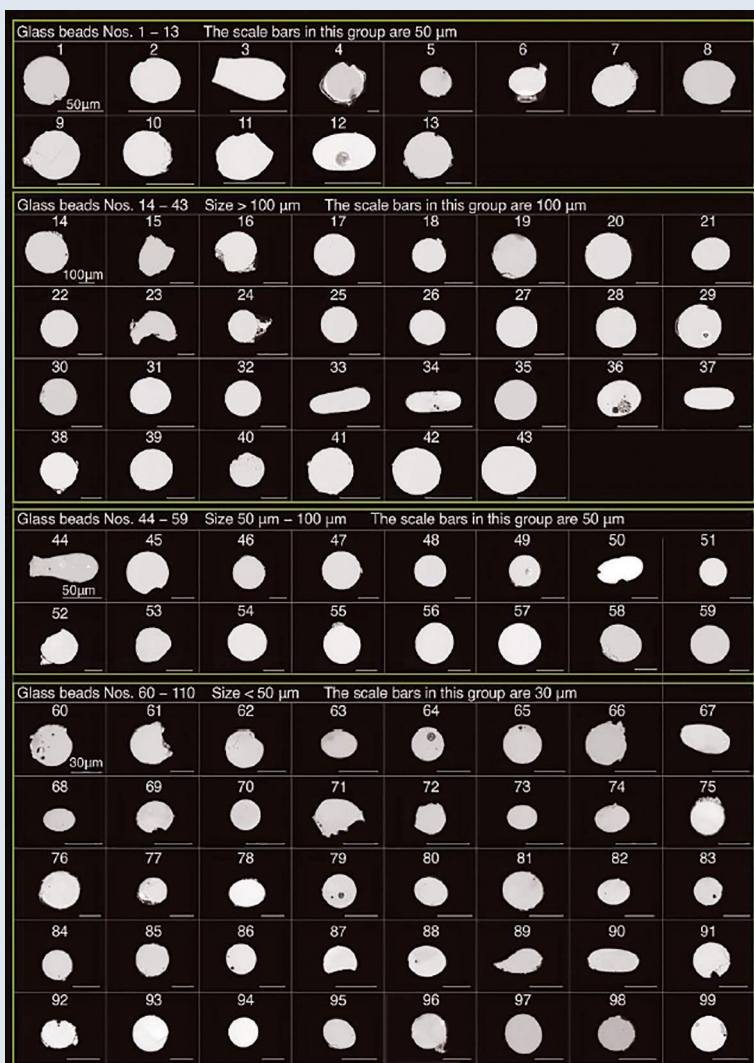


Рис. 2. Снимки стеклянных капель, которые изучали авторы, сделанные с помощью микроскопа. Источник: Zhang W.L. Qian at al. *Returned samples indicate volcanism on the Moon 120 million years ago. Science. 2024; 385(6713)*

который был доставлен на Землю в ходе миссии «Чанъэ-5» в 2020 г. Авторы сделали вывод о том, что эти капли имеют вулканическое происхождение и образовались 123 ± 15 млн лет назад. Это существенно меняет представления о том, что происходило на Луне в ходе ее истории, так как согласно предыдущим моделям, вулканизм на Луне прекратился примерно 1.1 млрд лет назад.

«Это открытие имеет важное значение для понимания истории вулканической активности на Луне и позволяет по-новому взглянуть на ее геологическую историю», – отмечает один из ведущих авторов исследования профессор Цюли Ли (Qiu-Li Li). По словам ученых, их исследование позволяет лучше понять не только динамику остывания недр Луны, но и всех

планет земной группы, поскольку проливает свет на очень важный вопрос: каким образом и как долго эти планеты высвобождали свое внутреннее тепло с момента образования?

Вначале профессор Чжан Цянь и его коллеги изучили около 3000 стеклянных капель (их диаметр составлял всего от 20 до 400 мкм, а в составе, как и у обычного стекла, преобладал диоксид кремния) с помощью электронной микроскопии, чтобы выделить из них образцы вулканического происхождения, и отсеять импактного (образованные в результате ударов метеоритов). После этого ученые определили в каплях соотношение изотопов серы-34 и серы-32 (в лунных вулканических образцах изотопов серы-32 должно быть больше, как следует из данных анализа образцов грунта, доставленного пилотируемой миссией NASA «Аполлон-12» в 1969 г.).

В результате для исследования остались всего три капли вулканического происхождения.

Они были датированы с помощью уран-свинцового метода, который показал, что образовались они 123 ± 15 млн лет назад.

Содержание редкоземельных элементов и тория в данных образцах оказалось очень высоким, и авторы предположили, что столь недавний по геологическим меркам вулканизм связан с локальным обогащением мантийных источников магмы тепловыделяющими элементами. А вот почему они были обогащены, остается вопросом для будущих исследований.

Согласно модели ударного формирования, спутник нашей планеты образовался примерно 4.5 млрд лет назад при столкновении протоземли с небесным телом. Затем, по всей видимости, Луна была полностью покрыта расплавленным океаном магмы. Лунная поверхность затвердела предположительно 4.12 млрд лет назад.

Дальнейший вулканизм на Луне – это по сути наиболее яркое проявление процесса потери Луной своего внутреннего тепла или «хвосты» эволюции океана магмы. Хизингер и его коллеги в 2012 г. подсчитали, что пик вулканической активности и массового излияния вулканитов на поверхность и формирования морей на Луне отчетливо выделяется в имбрийский период 3.7–3.8 млрд лет назад. Затем вулканическая активность стала постепенно снижаться и прекратилась примерно 1.1 млрд лет назад.

Они оценивали возраст морских образований на поверхности Луны (т. е., по сути, возраст вулканической активности) по плотности наложенных ударных кратеров. Этот метод считается общепринятым для оценки возраста поверхности почти всех тел Солнечной системы с твердой оболочкой. Но это модельный метод, а то, как все процессы происходили на самом деле, точно неизвестно. Теперь становится все более очевидным – чтобы провести точную датировку вулканизма на Луне, нужна доставка лунного грунта на Землю и проведение анализа в лаборатории.

Иванов М.А. «Очерк фундаментальных проблем геологии Луны». Доклад на заседании Научного совета РАН по проблемам геохимии 20.11.2024.
http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_449.aspx
Hiesinger H. et al. How old are young lunar craters? *Journal of Geophysics Research*. 2012; 117: E00H10.
Three glass beads bring into question the timeline of lunar volcanism. *Physics today*. 2024; 77(11):14–16 <https://pubs.aip.org/physicstoday/online/43676>
Zhang W.L. Qian et al. Returned samples indicate volcanism on the Moon 120 million years ago. *Science*. 2024; 385(6713).

Подготовила А.Ф. Говорова

О НЕОБХОДИМОСТИ РАЗВЕРТЫВАНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СТАНЦИИ «ВОСТОК» В АНТАРКТИДЕ

ГРЕБЕНЕВ Сергей Андреевич,

доктор физико-математических наук

Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/50044394824060100

Поступила в редакцию: 16.12.2024

Принята к публикации: 20.12.2024

Антарктида, без преувеличения, лучшее место на Земле для проведения астрономических наблюдений и измерений. Такие исследования уже активно ведутся на станциях «Амундсен–Скотт», «Кульунь», «Конкордия». В январе 2024 г. на российской станции «Восток» был введен в эксплуатацию новый зимовочный комплекс. О начале очередного этапа работы станции объявил лично Президент РФ В.В. Путин. Сейчас самое время для того, чтобы установить на станции «Восток» профессиональные астрономические телескопы и инструменты и начать наблюдения.

Уже более двух десятилетий происходит активное обустройство и использование для астрономических наблюдений Южного полюса Земли научными организациями США под эгидой Национального научного фонда (NSF). Широко известны результаты исследования анизотропии реликтового излучения и скоплений галактик по эффекту Сюняева–Зельдовича на миллиметровых и субмиллиметровых длинах волн Южнополярным телескопом SPT (South Pole Telescope), поиски следов первичных гравитационных волн по анизотропии реликтового излучения в тензорной B -модели поляризации в экспериментах Robinson BICEP (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization), а также регистрация внегалактических нейтрино установкой «Ледяной куб» (IceCube), просматривающей в поисках нейтрино толщу льда Антарктиды объемом в кубический километр. Многие помнят замечательные снимки падения 16 фрагментов кометы Шумейкеров–Леви 9

на поверхность Юпитера, полученные Южнополярным инфракрасным телескопом SPIREX в 1994 г.

НАБЛЮДЕНИЯ НА СТАНЦИИ «АМУНДСЕН-СКОТТ»

Все упомянутые инструменты находятся непосредственно на Южном полюсе, на станции «Амундсен–Скотт».

При этом они являются лишь «вершиной айсберга». Астрономическая программа станции, запущенная в начале 1990-х гг., включает уже не менее двух десятков экспериментов¹. Даже каждая из упомянутых выше установок успела пережить настолько серьезные реконструкции, что можно говорить о совсем разных инструментах, объединенных единым названием. Так, хотя зеркало Южнополярного

¹ Полный список можно найти здесь: www.nsf.gov/geo/opp/images/OPP_SouthPoleTelescopesTimeline_Final_Print.pdf

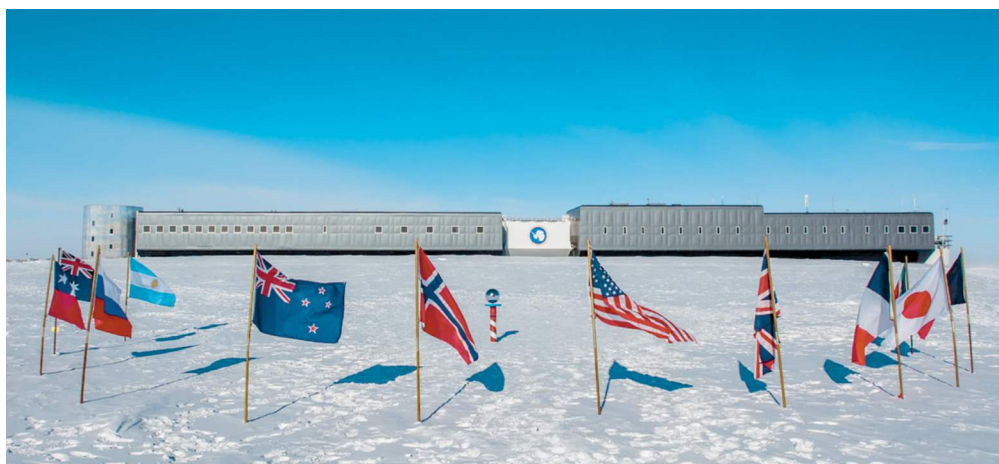


Рис. 1. Станция «Амундсен–Скотт» (новое здание, построенное в 2008). Основана в ноябре 1956 г. на высоте 2835 м над уровнем моря. Средняя температура -49°C (перепад температуры в течение года от -28 до -60°C). Средняя скорость ветра 5.5 м/с. Столбиком отмечено положение Южного полюса Земли. Источник: Интернет

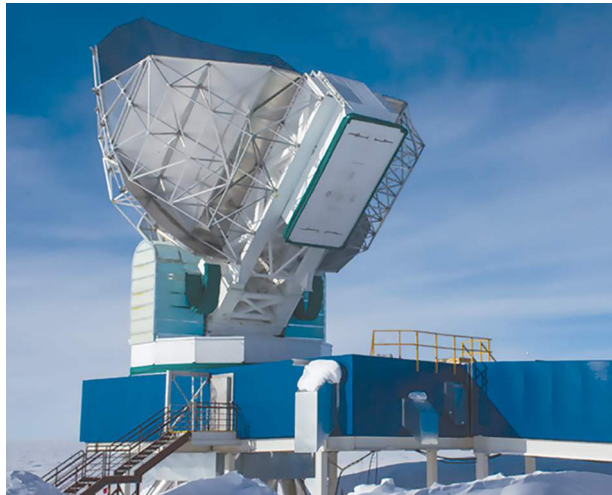


Рис. 2. «Темный сектор» станции «Амундсен–Скотт», где собраны все астрономические инструменты, сейчас это: SPT-3G, BICEP-3, BICEP Array. Расположен примерно в 700 м от здания станции. Источник: Интернет

телескопа (SPT) оставалось практически неизменным (диаметром 10 м, с шероховатостью поверхности 25 мкм, с полем зрения более 1° и угловым разрешением лучше $1'$), камеры телескопа постоянно улучшались: увеличивались их чувствительность, быстродействие (скорость картографирования неба выросла в 20 раз), появилась способность измерять поляризацию.

Всего было три поколения камер: SPT-SZ (2006–2012), SPTpol (2012–2017), SPT-3G (2017 – н.в.). А ведь у SPT на Южном полюсе были и установки-предшественницы: PYTON (1992–1997), AST/RO (1995–2005) и VIPER (1998–2005). Используемая в настоящее время камера SPT-3G представляет собой криогенную матрицу, охлаждаемую до 300 мК сначала по техноло-

Рис. 3. Южнополярный телескоп в последней (с 2017) модификации SPT-3G. Источник: Интернет



гии Pulse Tube Cryocooler, основанной на обратном цикле Карно, затем с помощью жидкого гелия. Матрица состоит из 16 000 болометров TES (Transition-Edge Sensors), позволяющих проводить высокоточные измерения температуры реликтового (CMB) излучения и его поляризации на трех частотах: 95, 150 и 220 ГГц. Действие болометров TES, работающих на границе сверхпроводящего перехода, основано на скачкообразном превращении сверхпроводника в металл, с соответствующим изменением сопротивления, при незначительном (несколько мК) изменении температуры.

Стоимость камер SPT-3G заметно превосходит стоимость самого телескопа. С помощью SPT на Южном небе по эффекту Сюняева–Зельдовича открыты тысячи ранее неизвестных скоплений

галактик – самых массивных концентраций вещества во Вселенной. Их уже больше, чем скоплений, открытых космической обсерваторией Planck на всем небе. SPT-3G в 7 раз чувствительнее этой обсерватории и эффективно обнаруживает даже очень далекие скопления.

Под общим названием BICEP тоже скрываются целых пять поколений инструментов: BICEP (2005–2009), BICEP-2 (2009–2012), BICEP-3 (2015 – н. в.), Keck (2011–2019) и BICEP Arrays (2019 – н. в.).

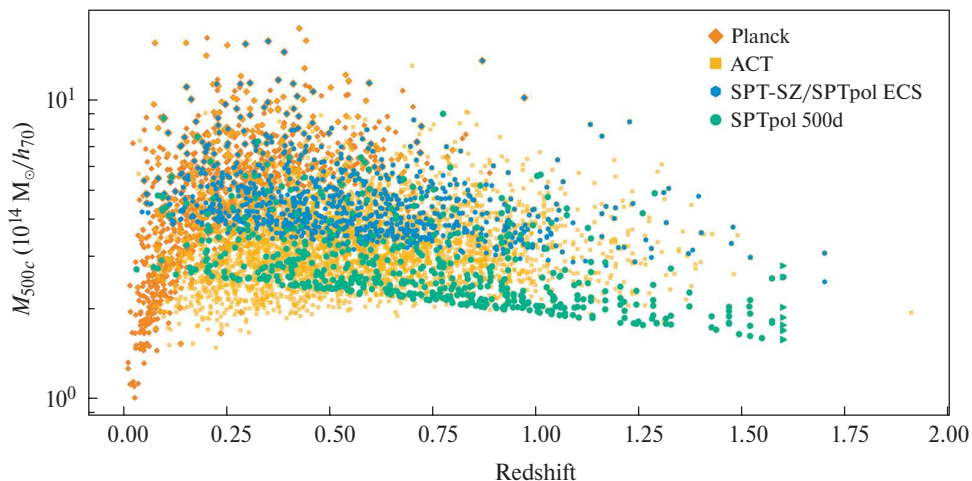


Рис. 4. Скопления галактик, открытые разными инструментами. Наиболее далекие скопления открыты Южнополярным телескопом по эффекту Сюняева–Зельдовича (Блим и др., 2024)



Рис. 5. SPT и BICEP, а также Keck и BICEP Arrays внутри защитного «капюшона».
Источник: Интернет

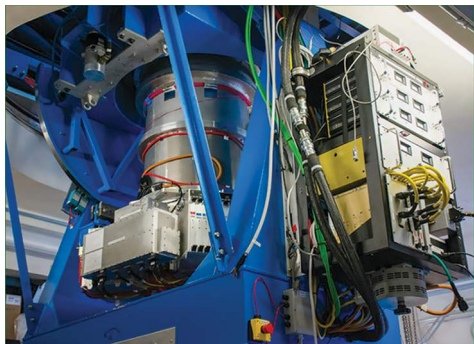


Рис. 6. BICEP-3, вид снизу.
Источник: Интернет



Рис. 7. Инфракрасный телескоп SPIREX.
Источник: Интернет

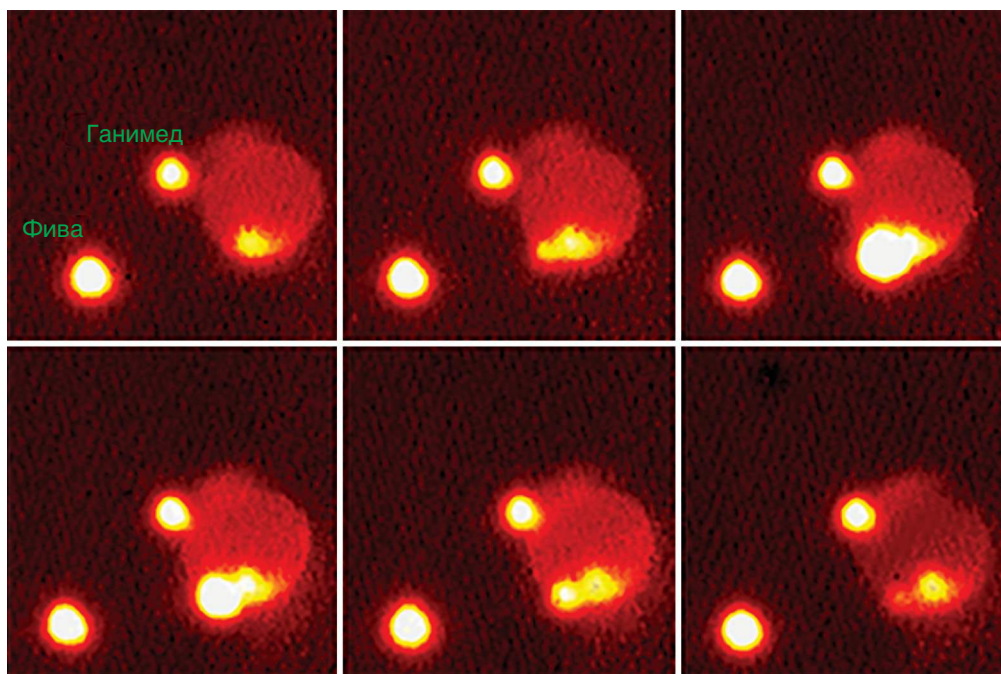


Рис. 8. Наблюдение телескопом SPIREX на 2.36 мкм столкновения фрагмента H кометы Шумейкеров–Леви 9 с Юпитером 18 июля 1994 г. Также видны спутники Юпитера: Ганимед и Фива. Источник: Интернет

Измерения проводятся в миллиметровом диапазоне 95–150 ГГц ($\lambda = 2\text{--}3\text{ мм}$), BICEP Array может наблюдать еще и на 30 и 270 ГГц. В процессе модернизации (BICEP-3 по сравнению с BICEP) число сенсоров выросло в пятьдесят раз (с 50 до 2560), в два раза увеличился диаметр апертуры (до 68 см) и поля зрения (до 28°), в три раза улучшилось угловое разрешение (с 0.93° до 0.35°). Массив Keck Array объединил уже 5 телескопов типа BICEP-2, установленных внутри защитного «капюшона», который остался от более раннего интерферометра DASI. Заменявший этот массив в 2019 г. BICEP Array объединил 4 телескопа типа BICEP-3. Здесь есть за что бороться, ради чего увеличивать чувствительность, поскольку BICEP является единственным инструментом, способным с помощью наблюдений подтвердить теорию инфляционно-

го расширения ранней Вселенной. Помощь BICEP должен оказать SPT-3G, который благодаря более высокому угловому разрешению позволит точно измерить компоненту анизотропии СМВ излучения в В-моду поляризации, связанную с гравитационным линзированием. Вклад этой компоненты затрудняет измерения анизотропии реликтового излучения в этой моде, вызванной первичными гравитационными волнами. Другая шумовая компонента в таких измерениях появляется из-за межзвездной пыли с высоким содержанием железа.

Следует отметить, что до BICEP на станции работали и более ранние установки по измерению поляризации реликтового излучения: уже упомянутая DASI (1999–2003) и Quid (2004–2008).

Нейтринная обсерватория IceCube также возникла не на пустом месте, до нее на Южном полюсе успешно

работала установка AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array). Особо следует отметить чуть менее известный инфракрасный телескоп South Pole InfraRed Explorer (SPIREX) системы Кассегрена, с зеркалом диаметром 60 см, который работал на Южном полюсе в 1993–1999 гг. Изначально оснащенный детектором GRIM, чувствительным на длинах волн $\lambda = 1\text{--}2.5$ мкм, он показал, что в полосе K_{dark} (2.27–2.45 мкм) фон неба на Южном полюсе в среднем в 220 раз ниже, чем в любом другом месте на Земле, достигая уровня яркости зодиакального света. Уже только по этой причине SPIREX выигрывал в чувствительности по сравнению с обычным телескопом 2.9 зв. вел., как если бы он имел диаметр зеркала 4 м или наблюдал с экспозицией в 220 раз более долгой. В 1994 г. SPIREX провел наиболее полную по сравнению с другими телескопами серию наблюдений столкновения кометы Шумейкеров–Леви 9 с Юпитером (наблюдалось 16 фрагментов из 21-го). В 1998 г. телескоп был оснащен более совершенной камерой Abu, чувствительной в полосе 2.4–5 мкм и способной получать изображения в поле $10'$ с размером пиксела $0.6''$. С этой камерой SPIREX исследовал ряд областей звездообразования: NGC6334, Chamaeleon I, η Chamaeleontis, Carina Nebula, 30 Doradus, RCW 57 и 38, Центр Галактики, в том числе в молекулярных линиях.

СТАНЦИЯ «КУНЬЛУНЬ» (KUNLUN)

В 2025 г. китайскими учеными должно завершиться строительство двух телескопов на станции «Куньлунь»: 2.5-метрового инфракрасного/оптического Kunlun Dark Universe Survey Telescope (KDUST) с полем зрения 2 кв. град., предназначенного для исследования землеподобных планет, и 5-метрового Dome A Terahertz Explorer (DATE5),

нацеленного на детальное исследование процесса звездообразования. KDUST предполагается установить на 15-метровой башне.

Но уже есть и более амбициозные проекты: в перспективе планируется создание и установка на станции 6–8-метрового инфракрасного телескопа и 15-метрового New Terahertz Telescope.

Станция «Куньлунь» была открыта совсем недавно, в 2009 г., в 7 км от купола А – высшей точки Антарктиды (4090 м над уровнем моря).

На куполе А уже работали четыре малых соосных телескопа CSTAR (Chinese Small Telescope Array) диаметром 145 мм с полем зрения $4.5^\circ \times 4.5^\circ$, постоянно направленных на Южный полюс. Каждый телескоп был оснащен своим фильтром (g , r , i и b/ϕ) и своей CCD матрицей Andor, состоящей из 1024×1024 пикселей (размер пиксела 13 мкм, что соответствовало $15''$). Комплекс CSTAR начал исследования еще в 2008 г. в составе временной экспедиции PLATO (PLATEau Observatory), потом был перенесен на станцию «Куньлунь».

Помимо фотометрии и поиска переменных звезд вблизи Южного полюса неба, комплекс, в частности, измерил фон неба в фильтре i (в среднем 19.8, а в безлунные ночи 20.5 зв. вел. на кв. сек дуги). В 2012–2014 гг. на станции были последовательно установлены и работали три полуметровых широкоугольных инфракрасных телескопа Шмидта AST3 (Antarctic Survey Telescopes), выполнившие большой объем наблюдений. В частности, первый телескоп из AST3 за первые 56 дней получил 26 000 снимков неба в поле зрения 4.3 кв. град. Эти телескопы были оснащены более крупными, чем CSTAR, CCD матрицами $12\,400 \times 12\,400$ пикселей с размером каждый $1''$. Наряду



Рис. 9. Станция «Куньлунь». Начала работать в 2009 г., расположена в 7 км от купола А, высшей точки Антарктиды (4090 м над уровнем моря). Источник: Интернет



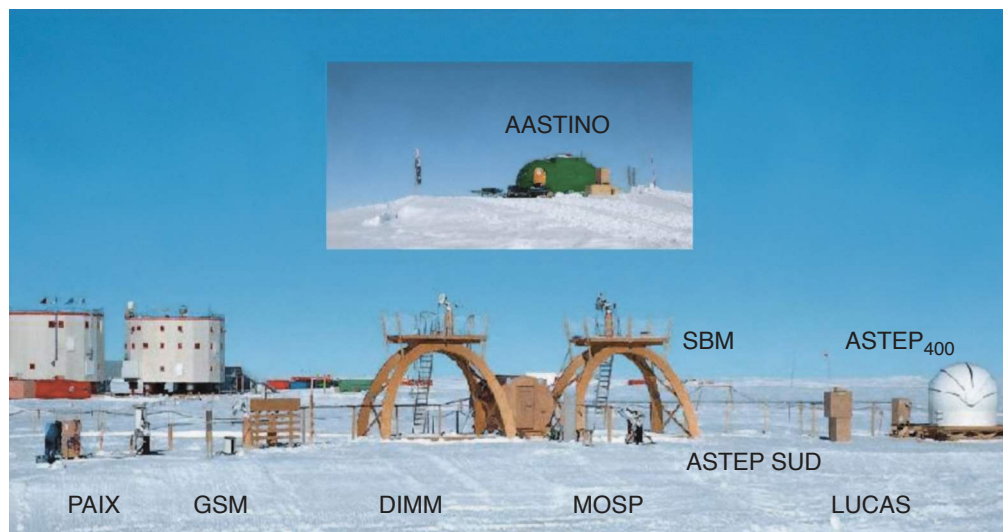
Рис. 10. Первый Antarctic Survey Telescope на станции «Куньлунь». Источник: Интернет



Рис. 11. Комплекс телескопов CSTAR на станции «Куньлунь» (слева) и телескоп АСТЗ-1 перед отправкой в Антарктиду (справа) (Юань и др., 2008)



Рис. 12. Панорамный вид на Concordiastro (платформы с приборами DIM и MOSP высотой 8 м, башни слева высотой 20 м).
Источник: Интернет



с решением чисто научных задач на этих телескопах изучались особенности астрономических наблюдений в условиях Антарктиды, отрабатывались методы борьбы с обледенением зеркала, с его запылением снегом, отлаживалась техника подогрева и стабилизации температуры подвижных частей.

СТАНЦИЯ «КОНКОРДИЯ» (CONCORDIA) НА КУПОЛЕ С АНТАРКТИДЫ

Астрономические исследования разворачиваются и на франко-итальянской станции «Конкордия», начавшей работу в 2005 г. и расположенной на

еще одной вершине (куполе С высотой 3260 м) Антарктиды. Правда, пока это больше исследования астроклимата, прежде всего «дрожания» атмосферы на разных высотах над поверхностью льда (приборы GSM, DIMM, AASTINO/MASS), приледной турбулентности (MOSP), а также яркости и прозрачности неба (SBM, PAIX и ASTEP SUD, соответственно), но намерения весьма серьезные. В частности, к 2030 г. здесь планируется установить уникальный 1.2-метровый Cryogenic Infrared Survey Telescope (Cryoscope) с полем зрения 50 кв. град., способный каждые 13 часов просматривать область неба площадью 20 000 кв. град. в фильтре Kdark до глубины 21.9 зв. вел. Прототип этого телескопа (уменьшенная в 5 раз копия) будет установлен уже в 2025 г. под астрокуполом, используемым сейчас 40-см оптическим телескопом ASTEP 400, ведущим поиск транзитов экзопланет. Для астрономии отведена специальная площадка вблизи станции, названная Concordiastro.

БАЛЛОННЫЕ ПОЛЕТЫ НАД АНТАРКТИДОЙ

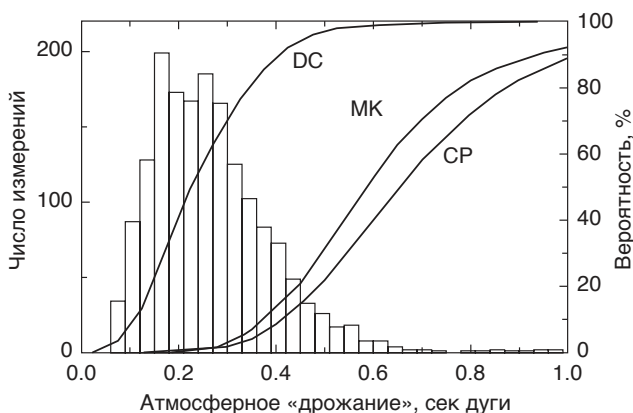
Для полноты картины следует упомянуть и баллонный эксперимент BOOMERANG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation AND Geophysics), проведенный над Антарк-

тидой для исследования анизотропии реликтового излучения. В 1998 и 2003 гг. были выполнены два полета воздушного шара на высоте около 40 км по приблизительно круговой траектории в соответствии с «розой» ветров, длившиеся около 2 недель. Шар запускался с американской прибрежной станции МакМурдо, в корзине находился радиотелескоп диаметром 1.3 м, оснащенный криогенными болометрами. Были получены высокочувствительные карты анизотропии реликтового излучения (CMB) в миллиметровом диапазоне с угловым разрешением 10', правда, в области, занимающей лишь 1.8% неба. В 2003 г. были получены еще и карты поляризации этого излучения. Эксперимент BOOMERANG стал заметным событием в исследованиях CMB в промежутке между работой на орбите микроволновых обсерваторий «Реликт» (1983–1984), COBE (1989–1993) и WMAP (2001–2010). Разрешение полученных в нем карт было заметно лучше разрешения, обеспечиваемого обсерваториями «Реликт» и COBE (6° и 7° соответственно) и даже обсерваторией WMAP (13').

ПРЕИМУЩЕСТВА АНТАРКТИДЫ

Преимущества использования Южного полюса и его окрестностей для астронаблюдений очевидны:

Рис. 13. Функция распределения (вертикальная ось справа) «дрожания» (seeing) атмосферы на высоте 30 м на куполе С Антарктиды (DC) по сравнению с атмосферой над обсерваториями Мауна Кеа (МК, Гавайи) и Сьерра Параналь (СР, Чили) (Бартон 2010). Гистограмма дает число измерений, во время которых было зарегистрировано данное значение «дрожания» (ось слева)



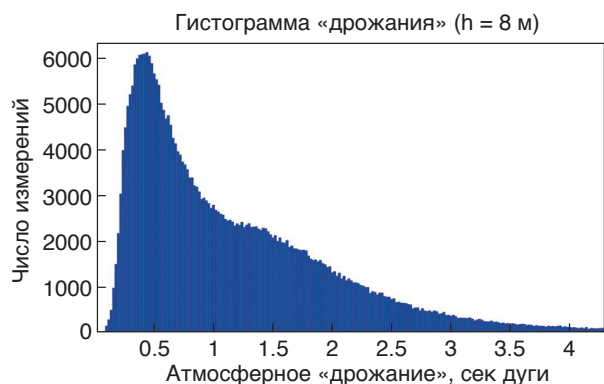


Рис. 14. Число измерений на куполе С на высоте 8 м с разными зарегистрированными значениями «дрожания» атмосферы (Бартон 2010). Пик распределения приходится на среднеквадратичную амплитуду «дрожания» около 0.4", что хуже, чем на высоте 30 м (см. гистограмму на предыдущем рисунке), но все же исключительно хорошо по сравнению с любыми другими местами

- постоянные экстремально низкие температуры, снижающие уровень фона и шумов аппаратуры;

- вымерзание водяного пара при почти полном отсутствии осадков, делающее атмосферу прозрачной в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах;

- длительная полярная ночь, дающая возможность вести непрерывные наблюдения в течение, по крайней мере, 4 месяцев (ясные ночи – свыше 90% времени);

- высокая прозрачность в инфракрасном и оптическом диапазонах и ослабленное «дрожание» атмосферы;

- большая высота над уровнем моря при плавном рельефе и отсутствие техногенных шумов и загрязнений воздуха.

Измерения показали, что среднеквадратичное «дрожание» (seeing) атмосферы, характеризующее степень «размытия» изображения, составляет:

- на куполе А (4093 м) 0.31" (иногда достигая даже 0.13"), что в 2.5–3 раза превосходит другие самые оптимальные для астрономических наблюдений места на Земле (Юань и др., 2008);

- на куполе С (3260 м) 0.27" (выше 30-метрового надледного слоя) и менее 0.15" в течение 25% всего времени (Лоуренс и др., 2004);

- на Южном полюсе (2820 м) 0.37" (выше 220-метрового надледного слоя – результат баллонных экспериментов (Маркс и др., 1999)).

Особенностью Антарктиды является почти полное отсутствие турбулентности в верхних слоях атмосферы, которая доставляет столько неприятностей астрономам, проводящим наблюдения в оптическом диапазоне. Именно такая турбулентность обычно оказывается причиной «дрожания» регистрируемого изображения. В то же время в Антарктиде непосредственно над поверхностью льда присутствует тонкий турбулентный слой, возникающий из-за инвертированного распределения температуры воздуха по высоте. Толщина слоя меняется от 15–30 м вблизи куполов А, В и С до 160–220 м на Южном полюсе. Таким образом, оптические и инфракрасные телескопы необходимо устанавливать как можно выше, по возможности, выше границы этого слоя. Наблюдения на куполе С показали, что функция распределения значений «дрожания» атмосферы на высоте 30 м (другими словами, доля дней в году с «дрожанием» меньше заданного) здесь разительно и выгодно отличается от лучших по астроклимату мест на Земле (Бартон, 2010).

Поиск мест в Антарктиде с наиболее спокойной атмосферой (Янг и др., 2023) показал, что самой оптимальной для астронаблюдений является вытянутая узкая область центральной Антарктиды, соединяющая купола В, А и F и охватывающая наиболее высокие ее части. В этой области, недалеко

от купола В, расположена российская станция «Восток».

Измерения также показали, что фоновая засветка неба в инфракрасных K, L и даже N диапазонах в 20–200 раз ниже, чем в любых других местах. А влажность воздуха столь низка, что Южный полюс вместе с высокогорной пустыней Атакама в Чили в области микроволновой астрономии сегодня успешно конкурируют с космосом (исследованиями на борту обсерваторий «Реликт», COBE, WMAP, Planck, не говоря уж о баллонных экспериментах, таких как MAXIMA, BOOMERANG, Archeops), еще недавно считавшимся единственно возможным местом для проведения таких наблюдений.

РОССИЯ В АНТАРКТИДЕ

Россия оказалась в стороне и совершенно не участвует в этом современном «астрономическом открытии» Антарктиды, несмотря на то, что СССР и Россия были пионерами ее исследования и активными участниками освоения: нашей страной было построено 8 долговременных станций. Не стоит

забывать и о том, что именно российским мореплавателям Ф.Ф. Беллинсгаузену и М.П. Лазареву принадлежит честь открытия этого континента в 1820 г.

Не секрет, что, несмотря на огромную территорию, в России нет мест с по-настоящему хорошим астроклиматом. Даже успешные российские обсерватории (Кавказская горная или Специальная астрофизическая) испытывают проблемы из-за усиливающегося антропогенного фактора. Так, в КГО яркость фона в фильтрах В и V возросла на 0.7 зв. вел. за 5 лет.

Россия в настоящий момент вообще не имеет действующих профессиональных телескопов для наблюдения Южной полусферы неба.

Прекрасный широкоугольный телескоп АЗТ-16, установленный в 1968 г. на горе Эль Робле в Чили, с 1973 г. не функционирует, несмотря на формальное возвращение прав на него Пулковской обсерватории в 2013 г. Требуется серьезная реконструкция, оснащение современными детекторами и финансирование, получить которое для телескопа, расположенного в другой стране, очень сложно.

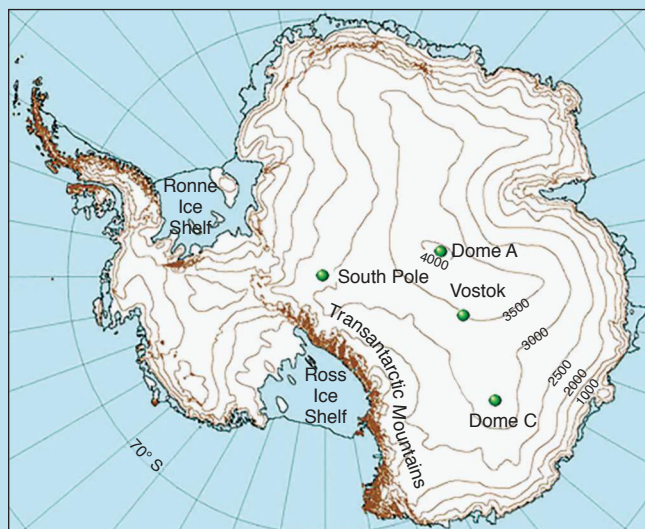


Рис. 15. Положение станции «Восток» в центральной Антарктиде. Источник: Интернет

И здесь оказывается крайне важным то, что принадлежащие России станции в Антарктиде являются такой же ее собственностью, как если бы они находились на ее внутренней территории. Нет риска из-за изменения политической ситуации потерять вложенные средства, как это может произойти при установке телескопа в других странах с хорошим астроклиматом.

Немаловажно и то, что доставка телескопа в центральную Антарктиду, учитывая ее пологий рельеф, должна быть намного проще, чем на новое место в горах сравнимой высоты, без готовых дорог и развитой инфраструктуры. Со станции «Прогресс», открытой в 1988–89 гг., на станцию «Восток» регулярно ходят санные поезда, летом летают легкие самолеты. В ноябре 2022 г. на станции «Прогресс» была открыта взлетно-посадочная полоса для тяжелых самолетов Ил-76, дополнительно к морскому берегу, используемому как причал.

Учитывая все вышесказанное, игнорирование возможностей, предоставляемых Антарктидой для астрономических исследований, кажется просто удивительным!

СТАНЦИЯ «ВОСТОК»

Все три упомянутые выше станции («Амундсен–Скотт», «Куныль», «Конкордия») расположены в центральных районах Антарктиды на расстоянии 1–2 тыс. км друг от друга. Почти посередине между ними находится российская станция «Восток».

Станция была основана 16 декабря 1957 г., т.е. совсем недавно ей исполнилось 67 лет. Названа в честь шлюпа «Восток», которым командовал Ф.Ф. Беллинсгаузен. Расположена на высоте 3488 м над уровнем моря. Толщина льда здесь достигает 3700 м, т.е. под станцией есть природная ложбина, предохраняющая лед от сползания. На дне ложбины замуровано реликтовое озеро Восток, поддерживаемое в жидком состоянии давлением толщи льда; станция находится над его окраиной. Станция «Восток» едва ли не самое холодное место на Земле: температура здесь лишь два месяца в году поднимается выше -40°C , средняя температура равна -55°C (самая высокая зарегистрированная температура была -14°C , самая низкая -89°C).



Рис. 16. Новый зимовочный комплекс станции Восток, введенный в эксплуатацию 28 января 2024 г. Источник: Интернет

Средняя скорость ветра 5.4 м/с. Абсолютная влажность воздуха близка к нулю, осадков (снега) в год выпадает менее 18 мм. Помимо дефицита кислорода, связанного с общей разреженностью воздуха, отмечается дефицит в воздухе углекислого газа CO_2 , приводящий к проблемам с дыханием, но благоприятный для микроволновых наблюдений. Наблюдается повышенная радиация. Станция находится вблизи Южного геомагнитного полюса Земли, примерно в 11.5° (что соответствует расстоянию 1280 км) от станции «Амундсен–Скотт». Такое угловое расстояние обеспечивает увеличение области неба, доступной для астрономических наблюдений, на примерно 20% по сравнению с Южным полюсом. То есть даже 10-метровый телескоп, установленный на станции «Восток», не будет просто дублировать Южнополярный телескоп станции «Амундсен–Скотт».

На станции «Восток» ведутся обширные исследования в области метеорологии, гляциологии, климатологии, магнитологии, геофизики, отдельно стоят исследования, связанные с озером Восток и бурением к нему глубокой скважины сквозь толщу льда. Ученые ожидают узнать здесь много нового о ранней истории нашей планеты, возможно, даже разгадать тайну возникновения жизни на Земле. Недавно произошла полная реконструкция станции «Восток», расконсервацию нового зимовочного комплекса станции и начало очередного этапа ее работы 28 января 2024 г. объявил лично Президент РФ В.В. Путин.

Кажется, сейчас самое время для того, чтобы попытаться установить на станции хотя бы скромный, но профессиональный первый телескоп, проверить условия и возможности для наблюдений.

ИНТЕРЕС К ИНФРАКРАСНОЙ И МИКРОВОЛНОВОЙ АСТРОНОМИИ В РОССИИ

Можно предположить, что у российских астрономов просто отсутствует интерес к наблюдениям в инфракрасном и миллиметровом-субмиллиметровом диапазонах, наиболее выигрышным в условиях Антарктиды. Однако это далеко не так. В 1959 г. в Пушинской радиоастрономической обсерватории ФИАН был создан первый в мире крупный телескоп миллиметрового ($\lambda = 8$ мм и 1.35 см) диапазона (РТ-22, конструктор П.Д. Калачев). Этот телескоп лидировал в исследованиях областей звездообразования, космических мазеров, высоковозбужденных атомов водорода на протяжении многих лет.

В настоящее время в России полным ходом идет изготовление космической обсерватории «Миллиметрон»



Рис. 17. Миллиметровый телескоп РТ-22 в Пушино

(«Спектр-М») с 10-метровым раскрываемым зеркалом для миллиметровых и субмиллиметровых (70 мкм – 10 мм) наблюдений. Обсуждаются перспективы установки подобного, но 3-метрового телескопа на поверхности Луны и полноповоротной антенны миллиметрового ($\lambda \geq 1.3$ мм) диапазона на площадке вблизи 6-метрового телескопа БТА САО РАН.

Много лет наша страна участвовала в строительстве 70-метрового радиотелескопа «Суффа» в Узбекистане для миллиметровых наблюдений, в 1991 г. замороженном и так и не возобновленном.

Огромную важность исследований в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах (0.6–28.3 мкм) наилучшим образом демонстрирует космическая обсерватория им. Джеймса Вебба (JWST) с 6.5-метровым сегментированным зеркалом, с 2022 г. ведущая наблюдения в точке Лагранжа L2 системы Солнце–Земля. Уже первые полученные результаты перевернули наши представления о формировании галактик и зарождении сверхмассивных черных дыр в ранней Вселенной.

ТРУДНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ АНТАРКТИДЫ

Холод и удаленность, другая специфика станции «Восток» накладывают очень серьезные требования к телескопам и приборам. В частности, будет необходимо: держать в тепле подвижные механические части и системы, устанавливать телескопы на высоте 10–15 м и выше на опорах (из-за поземки и приледного турбулентного слоя), подогревать зеркало на несколько градусов во избежание образования наледи и попадания снежной пыли, обеспечивать электропитание большой мощности (дизели и солнечные панели, аккумуляторы) и, конечно, передавать боль-

шой объем данных с помощью спутниковой связи. И прежде всего нужно будет обеспечить доставку многотонного телескопа на станцию санным поездом со станции «Прогресс».

Трудностей, безусловно, очень много. Однако они не идут ни в какое сравнение с тяжелейшими условиями дальнего космоса, считающегося идеальным местом для инфракрасных и субмиллиметровых наблюдений. Никого не смущает создание космической обсерватории «Миллиметрон» с 10-метровым криогенным зеркалом или 3-метрового лунного телескопа. История обсерватории им. Джеймса Вебба (JWST) с 6.5-метровым зеркалом наглядно показывает, насколько сложно создавать подобные космические системы: разработка обсерватории продолжалась почти 25 лет и стоила 10 млрд долларов США, что в 3 раз дольше и в 20 раз дороже, чем изначально планировалось. Видимо, из-за решения о создании обсерватории JWST, готовившейся к запуску в 2007 г., программа SPIREX не продолжилась в 2000-х гг., хотя это ожидалось.

Но главный аргумент за начало астрономических наблюдений на станции «Восток» – опыт эксплуатации астрономического комплекса на станции «Амундсен–Скотт», который убедительно показывает, что все указанные сложности вполне преодолимы.

ПРОГРАММА-МИНИМУМ

Вопрос о развертывании астрономических исследований на станции «Восток» и конкретных телескопах, которые там нужно будет установить, о стратегии их создания, источниках финансирования и общем плане работ должен рассматриваться специальной рабочей группой и утверждаться вышестоящим руководством. Тем не менее, какие-то соображения можно высказать уже здесь.

Очевидно, что наиболее перспективны для работы в Антарктиде телескопы, чувствительные в миллиметровых, субмиллиметровых и инфракрасных диапазонах. С другой стороны, ожидаемое высокое качество изображений и недоступность для российских телескопов Южной полусферы неба делают интересными и оптические наблюдения. А существование в стратосфере над Антарктидой гигантской «озоновой дыры» вкупе с общей высокой прозрачностью атмосферы и очень большой высотой станции над уровнем моря позволяют надеяться и на успех наблюдений в ближнем и среднем ультрафиолетовых (УФ) диапазонах ($\lambda = 200\text{--}400\text{ нм}$), а возможно даже и в дальнем УФ диапазоне ($\lambda = 115\text{--}200\text{ нм}$)². Озоновый слой в стратосфере на высоте от 15 до 40 км является основным препятствием для УФ наблюдений, но он же защищает нас и все живое на поверхности Земли от губительного воздействия УФ излучения Солнца.

«Озоновая дыра» появилась над Антарктидой в начале 1970-х гг. В результате принятых мер и ограничений (Монреальский протокол 1987 г.), а возможно и естественных, защищающих природу, процессов дыра после 2010 г. начала уменьшаться. Однако восстановление озонового слоя даже до уровня 1980 г. ожидается не ранее чем через 45–60 лет. Отмечу, что ранее в Антарктиде астрономические наблюдения в УФ диапазоне, на сколько мне известно, не проводились.

Кажется разумным установить на станции «Восток» в первую очередь следующие инструменты.

1. Пару оптических телескопов диаметром 20–30 см, помещенных на

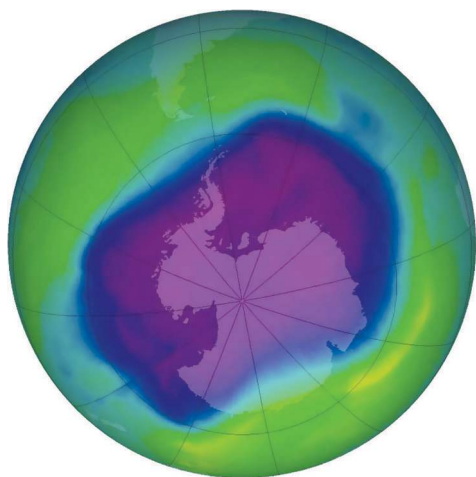


Рис. 18. «Озоновая дыра» над Антарктидой в 2006 г. Источник: Интернет

платформы (вышки) разной высоты в интервале 5–20 м и оснащенных мониторами дифференциального сдвига изображения (DIMM) для измерения среднеквадратичного «дрожания» атмосферы.

2. Инфракрасный/оптический телескоп с диаметром зеркала 40–60 см для всестороннего исследования астроклимата и особенностей наблюдений в условиях Антарктиды, а также выполнения первых научных наблюдений.

3. Радиотелескоп миллиметрового диапазона, подобный 13-метровым антеннам РТ-13, недавно установленным Институтом прикладной астрономии РАН в радиообсерваториях «Бадары», «Зеленчукская» и «Светлое» РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». По возможности, добиться улучшения качества поверхности его зеркала (уменьшить шероховатость). Помимо выполнения самостоятельных наблюдений такой телескоп позволит значительно удлинить базу радиоинтерферометра комплекса «Квазар-М», состоящего из телескопов РТ-13.

4. Возможные прототипы будущих телескопов космического базирования и их детекторов, таких как «Мил-

² К возможности наблюдений в УФ диапазоне внимание автора статьи привлёк ведущий научный сотрудник CAO РАН, д.ф.-м.н. А.В. Моисеев.



Рис. 19. Минимальное содержание озона в «озоновой дыре» по ежегодным измерениям Спектрметров картирования озона NASA (TOMS), установленных на разных космических аппаратах. По вертикальной оси указано число молекул озона в столбе воздуха площадью один квадратный сантиметр в единицах Добсона ($DU \cong 2.7 \times 10^{16}$ молекул).

Источник: Интернет

лиметр» и «Спектр-УФ». Антарктида предоставляет уникальную возможность для проверки и отработки таких инструментов на Земле в условиях, максимально приближенных к космическим³. А в дальнейшем, после завершения испытаний, их можно будет использовать как самостоятельные научные инструменты.

³ Так, в ходе баллонного эксперимента Archeops, в полетах над Арктикой в 2001–2002 гг. из г. Куруны (Швеция) в Сибирь, была проведена проверка и отработка прототипа высокочастотного детектора HFI обсерватории Planck.

5. Небольшой ультрафиолетовый телескоп-спектрограф для проверки эффективности наблюдений в УФ диапазоне в Антарктиде, а также исследования спектров горячих ярких звезд и водородных оболочек экзопланет.

Даже вышеперечисленные инструменты, скорее всего, не удастся поставить все сразу. Очевидно, что начинать нужно с приборов первого пункта, а дальше устанавливать телескопы по мере их готовности и с учетом результатов проведенных исследований астроклимата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель этой статьи – привлечь внимание российских астрономов, астрофизиков и космологов к потрясающим возможностям и замечательным перспективам, которые открывает Антарктида для астрономических наблюдений⁴. Из сказанного в статье, как мне кажется, ясно следует, что если мы не хотим безнадежно отстать от наших зарубежных коллег, необходимо начать астрономическое освоение российской станции «Восток» и как можно скорее.

⁴ Статья основана на материалах доклада, сделанного автором на заседании Бюро Совета по астрономии ОФН РАН 16 декабря 2024 г. На заседании решено создать рабочую группу для детальной проработки вопроса.

Литература

1. Barton M.G. Astronomy in Antarctica. *Astron. Astrophys. Rev.* 18, 417, 2010.
2. Bleem L.E. et al. Galaxy Clusters Discovered via the Thermal Sunyaev-Zel'dovich Effect in the 500-square-degree SPTpol Survey. *Open J. Astrophys.* 7, id.13, 2024.
3. Lawrence J.S. et al. Exceptional astronomical seeing conditions above Dome C in Antarctica. *Nature* 431, 278, 2004.
4. Marks R.D. et al. Measurement of optical seeing on the high antarctic plateau. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 134, 161, 1999.
5. Yuan X. et al. Chinese Small Telescope ARray (CSTAR) for Antarctic Dome A. *Proceedings of the SPIE Ground-based and Airborne Telescopes II* (eds. L.M. Stepp, R. Gilmozzi) 7012, id. 70124G, 2008.
6. Yang Q. et al. Discovery of calm astronomical sites over the antarctic continent. *Astron. J.* 165, 158, 2023.

Российские телескопы, способные наблюдать Южное небо

Российский телескоп АЗТ-16 в Чили

Широкоугольный телескоп системы Максутова АЗТ-16 был установлен на горе Эль Робле (Чили) на высоте 2100 м в 1968 г. Телескоп находится в 50 км от Сантьяго, от городской застройки он защищен горным хребтом. Позже здесь была организована обсерватория Серро-Эль-Робле Университета Чили. АЗТ-16 был изготовлен в ЛОМО в 1964 г. по проекту Д.Д. Максутова и считается его лучшим (и последним) телескопом. Это двухменисковый астрограф с диаметром зеркала $D = 700/900$ мм, фокусным расстоянием $F = 2076$ мм, полем зрения $5^\circ \times 5^\circ$. АЗТ-16 остается единственным крупным российским телескопом, потенциально способным наблюдать Южную полусферу неба. За две недели телескоп в пределах своей чувствительности позволяет измерить положение всех звезд Южного неба. До 1973 г. (прихода к власти в Чили генерала Пиночета) наблюдения проводились в рамках Чилийской



АЗТ-16 на горе Эль Робле в Чили (фото 2015 г.). Источник: Интернет

экспедиции Главной (Пулковской) астрономической обсерватории АН СССР под руководством чл.-корр. АН СССР М.С. Зверева. Помимо большого числа астрометрических измерений телескопом были открыты десятки астероидов, более сотни сверхновых. В 2013 г. Пулковская обсерватория вернула права на телескоп, однако требуется его серьезная реконструкция, оснащение современными детекторами и значительное финансирование.

Телескопы MASTER-SAAO и MASTER-OAFA

Еще один российский широкоугольный телескоп, способный наблюдать Южное небо, MASTER-SAAO установлен вблизи г. Сазерленд в Южно-Африканской астрономической обсерватории (SAAO), на высоте 1760 м, на широте -32.4° . Телескоп современный, спаренный ($D = 2 \times 400$ мм, $F = 1000$ мм, поле зрения $2 \times 18^\circ \times 24^\circ \approx 900$ кв. град.). Другой подобный телескоп MASTER-OAFA установлен в Аргентине вблизи г. Сан-Хуан в Астрономической обсерватории им. Феликса Агилара, на высоте 2430 м, приблизительно на такой же широте -31.8° . Оба телескопа являются компонентами сети Mobile Astronomical System of TElescope-Robots, созданной в МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством проф. В.М. Липунова. Сеть предназначена для оптического сопровождения космических гамма-всплесков и других транзиентных явлений. MASTER-SAAO и MASTER-OAFA способны регистрировать вспыхнувшие источники с предельной звездной величиной 14^m за 5 с, однако являются узкоспециализированными и их вряд ли можно отнести к телескопам даже среднего класса.



Телескоп MASTER-SAAO в Южной Африке. Источник: Интернет

Радиотелескоп РТ-13 комплекса «Квазар-М»

В 2016 г. Институтом прикладной астрономии РАН введены в опытную эксплуатацию два телескопа РТ-13, в 2018 г. – еще один. Телескопы размещены в радиообсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» «Зеленчукская», «Светлое», «Бадары» и образуют новый интерферометр «Квазар-М». Они используют оптическую схему Кассегрена с главным зеркалом диаметром 13.2 м с кольцевым облучением и подстраиваемым вторичным зеркалом на гексаподной подвеске, альтазимутальную полноповоротную монтировку. Качество поверхности зеркала достигает 53–58 мкм (амплитуда среднеквадратичного отклонения) и позволяет регистрировать излучение в миллиметровом диапазоне длин волн. Однако в настоящее время антенны оснащены приемниками, регистрирующими излучение в дециметровом и сантиметровом диапазонах – одновременно в трех полосах: S (2.2–2.6 ГГц), X (7.0–9.5 ГГц) и Ka (28–34 ГГц), в обеих круговых поляризациях.

Изготовлены антенны фирмой Vertex Antennentechnik GmbH.



РТ-13 в обсерватории «Зеленчукская»

Указатель статей и заметок, опубликованных в 2024 году

БЕЛЕНЬКАЯ Е.С., АЛЕКСЕЕВ И.И., КАЛЕГАЕВ В.В. Экзопланеты в Галактике	1
БЕЛЯЕВ М.Ю. Изучение Земли в эксперименте «Ураган»	2
БОГАЧЁВ С.А. Бывают ли на Солнце супервспышки?	6
БУШУЕВА И.С. Что было и что будет с ледником Алибек?	5
ГОВОРОВА А.Ф. Марс подает признаки жизни	1
ГУДКОВА Т.В. Приливные взаимодействия в Солнечной системе	1
ЗЕЛЁНЫЙ Л.М., ГОЛУБЬ А.П., МОРОЗОВА Т.И., ПОПЕЛЬ С.И. Магнитное поле хвоста магнитосферы Земли и перенос лунной пыли	4
ЗЕЛЁНЫЙ Л.М., ЗАРУБИН Д.С., ПЕТРУКОВИЧ А.А. Лунная одиссея 2024 года. Начало освоения «седьмого континента Земли»	4
ЗЕЛЁНЫЙ Л.М., ПЕТРУКОВИЧ А.А., ЗАРУБИН Д.С. Использование пилотируемых космических комплексов для проведения научных исследований	2
ЗЕНЧЕНКО Т.А. Солнце и человек: сохраняются ли старые связи в XXI веке?	6
ЗИМОВЕЦ И.В., ШАРЫКИН И.Н. Солнечные вспышки, произошедшие в мае 2024 года: был ли возможен прогноз?	6
ИПАТОВ А.В., ВЕДЕШИН Л.А., ГЕРАСЮТИН С.А. Мониторинг космического мусора и перспективы освоения околоземного космического пространства	2, 3
КАРПОВИЧ Е.А., КОМБАЕВ Т.Ш., ФОРШТЕР Е.Б. Каким может быть первый крылатый исследователь Красной планеты?	1
КИРИЧЕНКО А.С. Обзор сообщений о последствиях солнечных и геомагнитных событий в мае 2024 года	6
КУСТ Г.С., АНДРЕЕВА О.В., ЛОБКОВСКИЙ В.А. Достижение нейтрального баланса деградации земель – путь преодоления тихого кризиса планеты	5
ЛОБОДА И.П. О солнечном цикле замолвите слово	6
МИНЛИГАРЕЕВ В.Т., БОГАЧЁВ С.А. Экстремальные солнечные и геомагнитные события в мае 2024 года	6
МИТРОФАНОВ И.Г., ЛИТВАК М.Л., ГОЛОВИН Д.В., КОЗЫРЕВ А.С., МОКРОУСОВ М.И., ПЕКОВ А.Н., ТРЕТЬЯКОВ В.И. Эксперимент «БТН-Нейтрон»: изучение радиационного фона на борту МКС и РОС	2
МОРОЗОВА Т.И. О чем звучат метеоры	2
ПЕТРОВ О.Ф., ЗОБНИН А.В., ЛИПАЕВ А.М., УСАЧЕВ А.Д. Эксперимент на космической аппаратуре «Плазменный кристалл-4»	2
ПЕТРУХИН А.А. Исследование планет-гигантов межпланетными космическими аппаратами	1
САЖИНА О.С. Складки пространства-времени: история поиска космических струн во Вселенной	3
СИЛЬЧЕНКО О.К. Эволюция галактик: подарки окружения	3
ЦВЕТКОВ А.С. От Земли до Вселенной: история определения расстояний	3
ШУРШАКОВ В.А., ИВАНОВА О.А., КАРЦЕВ И.С. Фантомы-свидетели, космонавты и радиация	2

Космическое образование

ГОЛОВАНОВА А.В., МАГАРЯН К.А., ИНОЗЕМЦЕВА А.В., НАУМОВ А.В. Четвертая Всероссийская викторина юных физиков ОФН РАН	4, 5
Солнце и климат в задачах и ответах	6

Космонавтика XXI века

ЛИСОВ И.А. «Чанъэ-6» вернулась!	4
ШУБИН П.С. Взгляд в будущее лунных баз	4

Люди науки

ГЕРАСЮТИН С.А. Памяти Ефрема Павловича Левитана	4
ИПАТОВ С.И. Вклад Т.М. Энеева в планетную космогонию	5
КОРОСТЕЛЕВ С.Г. Леонид Ксанфомалити: Иду на грозу	5
РЯБЦЕВА Л.В. О Е. П. Левитане. К 90-летию со дня рождения	4

История науки

КОЦЮРБЕНКО О.Р., ГОВОРОВА А.Ф. Философия космизма и становление российской астробиологии	3
--	---

Обсерватории, институты, планетарии

ГРЕБЕНЕВ С. А. О необходимости развертывания астрономических наблюдений на станции «Восток» в Антарктиде	6
ДОБРЕНЬКАЯ М.В. Из истории первого «космического» архива	4
РУБЛЁВА Ф.Б., ПЕРХНЯК А.Н. Астрономическому кружку Московского планетария – 90 лет	4
СОЛОМОНОВ Ю.В., ГЕРАСЮТИН С.А. «Второй телескоп Америки»	3

Гипотезы, дискуссии, предложения

СОЛОВЬЁВ А.А. О прогнозе экстремальных событий в природе и обществе	3
---	---

Любительская астрономия

ОЩЕПКОВ М.Ю. Синие вспышки красных карликов	5
СОЛОМОНОВ Ю.В., ГЕРАСЮТИН С.А. Незаметная Рысь	5

Коротко и интересно

На Мимасе обнаружили молодой океан	1
Телескоп ALMA увидел в протопланетном диске огромную массу воды	1
Вулканы Ио продолжают непрерывно извергаться уже 4.5 миллиарда лет	2
Активность гейзеров на Энцеладе регулирует движение льда	2
Китай и Франция запустили обсерваторию для наблюдения за гамма-всплесками	3
VeriColombo во время четвертого гравитационного маневра сфотографировал Меркурий на близком расстоянии	3

Планетологи подтвердили гипотезу о том, что молодую Луну покрывал океан магмы	4
Еуропа Clipper стартовал к системе Юпитера	5
На Марсе нашли воду под поверхностью	5
«Джеймс Уэбб» обнаружил самую маленькую блуждающую планету	6
Вулканизм на Луне стал моложе	6

Литературный космос

ЗАКУТНЯЯ О.В. Советский фантаст Александр Беляев	1
МАРУСЕВ А.С., ГАЧЕВА А.Г., ДУНАЕВА А.Ю. Русский космизм в музыке: «Былина о Святогоре»	5
ФЕЛЬДМАН Д.Ю. Современник будущего	1
Резолюция Третьей международной конференции «Дорога в космос»	5

EARTH & UNIVERSE

6 (360), 2024
November–December

TABLE OF CONTENT:

Sergey A. BOGACHEV Editorial	3
Vladimir T. MINLIGAREEV, Sergey A. BOGACHEV Extremal Solar and Geomagnetic Events in May 2024	6
Ivan V. ZIMOVETS, Ivan N. SHARYKIN Solar Flares in May 2024: Could We Forecast?	18
Alexey S. KIRICHENKO Review of Reports on the Effects of Solar and Geomagnetic Events in May 2024	38
Sergey A. BOGACHEV Are There Super Solar Flares?	45
Ivan P. LOBODA Solar Cycle Not To Be Forgotten	56
Tatiana A. ZENCHENKO The Sun and Human: Do Old Links Persist in XXI Century?	72
Aerospace Education	
The Sun and Climate in Q&As	92
In Brief	
JWST Discovered the Smallest Rogue Planet	98
Lunar Volcanism Becomes Younger	100
Observatories, Institutes	
Sergey A. GREBENEV Regarding the Need to Start Astronomical Observations at Vostok Station in Antarctica	103
<i>Earth & Universe Index 2024</i>	122

Cover image: Images of the Sun on May 8, 2024, taken by AIA instrument onboard SDO mission (NASA), in 171 angstrom (first cover page) and 304 angstrom (last cover page, the image is mirrored) band. Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams

Индекс 38808

Земля и Вселенная, 6/2024

Заведующая редакцией А.Ю. Обод

Редакторы С.А. Герасютин, Д.А. Кононов, О.С. Сажина

Корректор С.О. Розанова

Верстка макета Н.В. Мелковой

Просим обращаться

по вопросам публикации материалов:

+7(495) 276-77-35 (доб. 42-31), e-mail: zevs@naukapublishers.ru

по вопросам сотрудничества:

+7(495) 276-77-35 (доб. 43-01 или 43-02),

e-mail: journals@naukapublishers.ru

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом

Совета министров СССР по печати 28 июня 1991 г.

Свидетельство о регистрации № 2119

www.naukabooks.ru/zhurnali/katalog/zemlja-i-vselennaja/

Все права защищены.

Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Все иллюстрации в статьях предоставлены авторами.

*Ответственность за точность и содержание рекламных
материалов несут рекламодатели*

12+

Сдано в набор 28.12.2024 Подписано к печати 20.03.2025

Дата выхода в свет 07.04.2025 Формат 70 × 100¹/₁₆

Цифровая печать Усл.печ.л. 10,4 Уч.-изд.л. 10,4 Бум.л. 4,0

Тираж 192 экз. Заказ № 1723 Цена свободная

Учредители: РАН, ФГБУ «Издательство «Наука»

Редакция и издатель: ФГБУ «Издательство «Наука»

Адрес: 121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Отпечатано в типографии ФГБУ «Издательство «Наука»

Адрес: 121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК



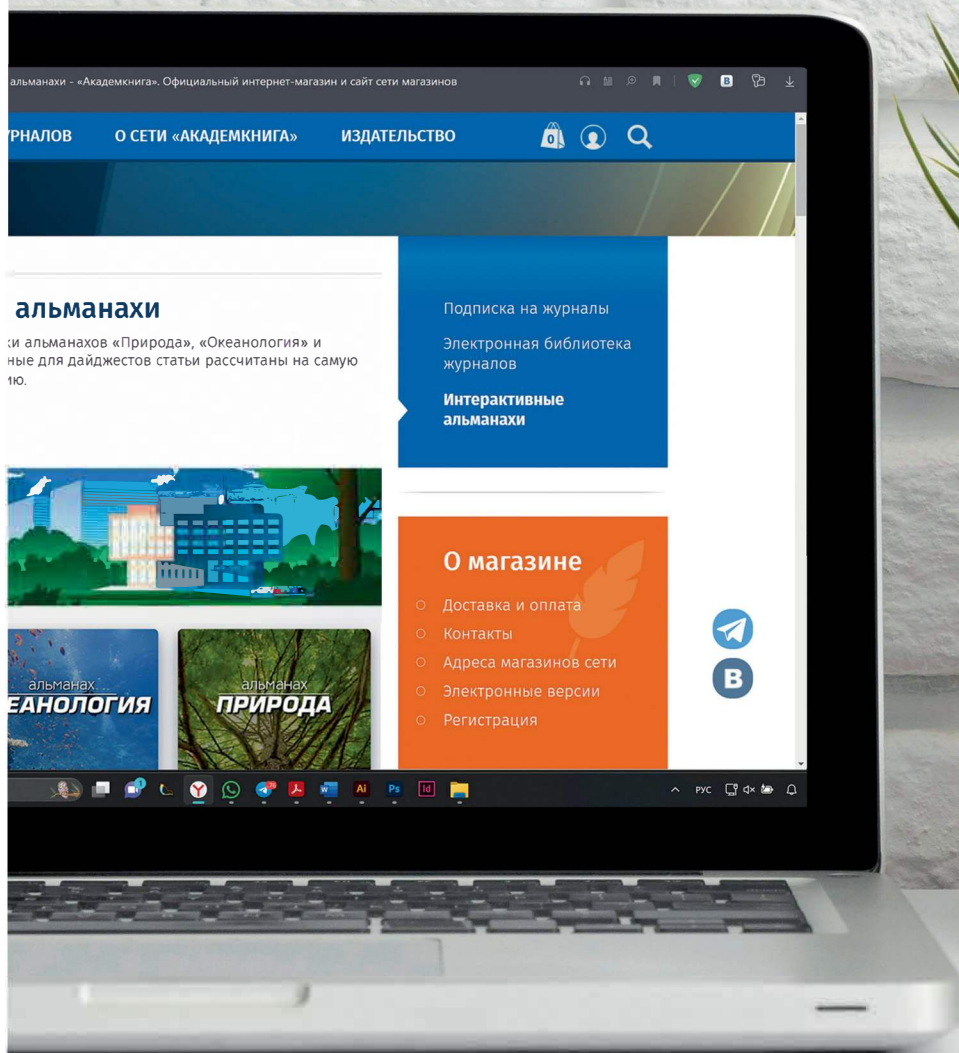
ПОКУПАЙТЕ ДЕШЕВЛЕ В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»



КНИГИ



ЖУРНАЛЫ



www.naukabooks.ru



НАУКА
— 1727 —

SDO/AIA 304 2024-05-08 00:09:18 UT



ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
тел.: +7 (495) 276-77-35
info@naukapublishers.ru
naukapublishers.ru

ISSN 0044-3948



9 770044 394007